

Jüri Vedru
Jaan Pruulmann

ELUSSÜSTEEMID



Märgatud vigadest palume teatada autoreile
e-postiga aadressil *juri.vedru@ut.ee*

Tartu Ülikool
Loodus- ja tehnoloogiateaduskond

Jüri Vedru Jaan Pruulmann

ELUSSÜSTEEMID

*entroopia * informatsioon * organiseeritus * kommunikatsioon * juhtimine*

Loengukonspekt



Eesti tuleviku heaks



Euroopa Liit
Euroopa Sotsiaalfond

Tartu 2012

Loengukonspekt on koostatud Euroopa Sotsiaalfondi poolt toetatud projekti 1.2.0402.09-0055 “Tallinna Tehnikaülikooli ja Tartu Ülikooli biomeditsiinitehnika ja meditsiinifüüsika magistritaseme ühisõppekava arendamine tööturu vajadustest lähtuvalt” raames.

Toimetanud: Mari-Ann Tamme

Kujundanud: Tiia Eikholm

Kaane fotod:

Esikaas: © Chris Gray / Corbis

Tagakaas: © Xunbin Pan / Dreamstime.com

Autoriõigused: Jüri Vedru, Jaan Pruulmann, 2012

ISBN 978-99496-23-352-6

TTÜ kirjastus, 2012

Sisukord

| | |
|---|-----------|
| Eessõna | 5 |
| 1 Klassikalisest termodünaamikast | 7 |
| 1.1 Termodünaamika põhimõistetest | 7 |
| 1.1.1 Mis on termodünaamika? Terminid | 7 |
| 1.1.2 Klassikaline termodünaamika | 13 |
| 1.2 Energia ja selle jäävus | 14 |
| 1.2.1 Energia, töö ja soojuse mõisted | 14 |
| 1.2.2 Energia jäävus | 19 |
| 1.3 Entroopiaseadus | 22 |
| 1.3.1 Carnot' teoreem | 23 |
| 1.3.2 Entroopiaseaduse ilmumine termodünaamikas . | 26 |
| 1.3.3 Entroopia mittetasakaaluprotsessides | 32 |
| 2 Entroopia statistilisest tähendusest | 39 |
| 2.1 Entroopia statistiline tõlgendus | 39 |
| 2.1.1 Boltzmanni idee | 39 |
| 2.1.2 Boltzmanni entroopiavalem | 46 |
| 2.1.3 Gibbsi entroopiavalem | 49 |
| 2.2 Entroopiaseaduse järelmid | 54 |
| 2.2.1 Järetselgitusi entroopia kasvamisele | 54 |
| 2.2.2 "Entroopiavõidujooks" | 57 |
| 3 Termodünaamika hilisemad arengud | 61 |
| 3.1 Mittetasakaaluline termodünaamika | 61 |
| 3.2 Nõrgalt mittetasakaaluliste süsteemide termodünaamika | 62 |
| 3.3 Tugevalt mittetasakaaluliste nähtuste termodünaamika | 69 |
| 3.3.1 Mittelineaarsuse avaldumine | 69 |
| 3.3.2 Dissipatiivsed struktuurid | 71 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 4 | Informatsioon | 79 |
| 4.1 | Shannoni informatsiooniteooria | 79 |
| 4.1.1 | Pisut ajaloost | 79 |
| 4.1.2 | Informatsiooniteooria <i>Bell Laboratories</i> 'ist . . . | 81 |
| 4.1.3 | Informatsioon ja entroopia | 88 |
| 4.2 | Informatsiooniteooria kriitika | 90 |
| 4.2.1 | <i>Vesi pole veis</i> | 90 |
| 4.2.2 | Valge müra paradoks | 93 |
| 4.2.3 | Raamatukogu teeklaasis | 95 |
| 4.3 | Informatsiooni semantiline külg | 98 |
| 5 | Organiseeritus ja kommunikatsioon | 105 |
| 5.1 | Organiseeritus | 105 |
| 5.1.1 | Elusolend | 105 |
| 5.1.2 | Elussüsteemide stabiilsusest | 111 |
| 5.1.3 | Organiseerituse hindamisest | 113 |
| 5.2 | Kommunikatsioon | 117 |
| 5.2.1 | Kommunikatsiooni mudelid | 118 |
| 5.2.2 | Suhtleja mudel | 122 |
| 5.2.3 | Mõisted ja mõistemudelid | 128 |
| 5.2.4 | Kontekst ja terminid | 132 |
| 6 | Juhtimine | 135 |
| 6.1 | Organisatsioonid ja juhtimine | 135 |
| 6.1.1 | Organisatsiooni ja juhtimise mõisted | 135 |
| 6.1.2 | Eesmärgistamise skeemid organisatsioonides . . | 138 |
| 6.2 | Juhtimisskeemid | 142 |
| 6.2.1 | Tagasisideta juhtimine | 142 |
| 6.2.2 | Lihtsa tagasisidega juhtimine | 144 |
| 6.2.3 | Adaptiivne juhtimine | 147 |
| 6.2.4 | Evolutsioonisarnane tagasiside | 152 |
| | Lisad | |
| | Märksõnaregister | 154 |
| | Kasutatud pildimaterjal | 158 |
| | Viidatud kirjandus | 159 |

Eessõna

Loengukonspekt on mõeldud kursuse “Elussüsteemid” kuulajatele, kelleks on eelkõige oodatud üliõpilased TÜ ja TTÜ biomeditsiinitehnika ja meditsiinifüüsika magistriõppest, aga kutsutud on ka teiste erialade magistriõppe üliõpilased, keda see aine huvitab. Konspekt eeldab lugejalt reaalaladele iseloomulikku mõtteviisi ja matemaatika tundmist reaalalade bakalaureuse tasemel.

Elu nähtus on inimkonna ajaloo jooksul paljudele väljapaistvatele mõtlejatele ainet pakkunud. Kõnealuse kursuse ja konspekti eesmärk on tutvustada ka üliõpilastele eluga seotud füüsikalisi ja küberneetilisi mõisteid ning kontseptsioone, anda sissejuhatav ülevaade elunähtuste uurimise probleemidest ning tõuge sellesuunaliseks iseseisvaks mõtlemiseks.

Konspekti pealkiri on ühendus kahest kursust läbivast terminist – *elus* ja *süsteem*, mida on vaja selgitada. Alustame lihtsamast.

Süsteemiks nimetame siin objekti, mis koosneb omavahelises vastasmõjutuses olevatest osadest. *Elussüsteemideks* nimetame süsteemide seast selliseid, millele on omane *elu*.

Edasi läheb seletamine raskeks – *elu* on nähtavasti nii lai mõiste, et seda ei ole lihtne seletada mõne temast üldisema mõiste abil. Saab anda küll seletuse, et *elu on elussüsteemide olemise viis*. Selline seletus sõnastab seose *elu*, *elussüsteemide* ja *olemise* vahel. Aga pigem on *elu* lühidaks iseloomustamiseks mõtet seda kirjeldada, loetledes *elussüsteemide* iseloomulikke omadusi.

Neis süsteemides

- püsib termodünaamiliselt mittetasakaaluline seisund;
- on kõrge organiseeritus;
- toimib homöostaas ja toimub ainevahetus;

- toimub juhtimine;
- nad kasutavad püsimiseks informatsiooni;
- need süsteemid evolutsioneeruvad.

Loetelu pole küll kaugeltki ammendav, kuid juba siin sisaldub hulk uusi täpsemat selgitamist vajavaid mõisteid. Sedalaadi mõisteid ja mõnda lihtsamat või keerulisemat kontseptsiooni selgitabki kõnealune konspekt.

1. peatükk annab ülevaate termodünaamikas sõnastatud olulisematest loodusseadustest – energia jäävuse seadusest ning entroopia-seadusest, mis väljendavad elussüsteemide olemasolu võimalikkust ja viisi tagavaid fundamentaalseid tingimusi.

2. peatükis vaadeldakse entroopia mõistet statistilisest vaatekohast – seostatakse see süsteemi oleku tõenäosusega, mis annab uue võimaluse aru saada entroopia tähendusest.

3. peatükis refereeritakse termodünaamika uuemaid arenguid, mille kaudu loodetakse saada selgust elu tekke ja püsimise mehhanismi kohta.

4. peatükk tegeleb informatsiooni – elussüsteemide ühe olulisema atribuudi – mõiste ja omadustega.

5. peatükis käsitletakse elussüsteemide organiseeritust – informatsiooni kehastust neis – ja kommunikatsiooni – informatsiooni vahetust neis ning nende vahel.

6. peatükis on kõne all juhtimine, mis on väga oluline elussüsteemide funktsioneerimises osalev nähtus.

Konspekti esimesed peatükid on füüsikalähedasemad. Neis on püütud esitada üldtunnustatud seisukohti. Järgmistes peatükkides käsitletakse ka traditsioonilises füüsika- või inseneriõppes harvemini vaadeldavaid ja veel mitte päriselt selginud aktuaalseid teemasid.

Peatükid 1.-3. on kirjutatud Jüri Vedru, peatükid 4.-6. on kirjutatud Jaan Pruulmann, v.a teemad 4.3 ja 5.1, mis pärinevad Jüri Vedrult.

Autorid tänavad filosoofiadotsent Valdar Parvet kriitika ja olulise abi eest raamatu filosoofiaga seotud küsimustes.

Peatükk 1

Klassikalisest termodünaamikast

Miks on selles kursuses vaja termodünaamikat?

Termodünaamika uurib küsimusi, mis on olulised elu olemasolust ja olemusest arusaamiseks. Termodünaamika seadused määravad üldised materiaalsed tingimused elu olemasoluks ja elussüsteemide üldised omadused. Elussüsteemidega seoses kasutatakse füüsikale toetuvates arutlustes tihti termodünaamikast alguse saanud kontseptsioone ja mõisteid, viimaste seas eriti *entroopia* mõistet. Seetõttu on raamatu algusosa pühendatud põhimõistete ja -kontseptsioonide selgitamisele, sealjuures peatähelepanu on pööratud entroopia, mida järgmistes peatükkides tihti kasutatakse.

1.1 Termodünaamika põhimõistetest

1.1.1 Mis on termodünaamika? Terminid

Termodünaamika (kr k $\theta\epsilon\rho\mu\eta$ – soe, $\delta\nu\nu\alpha\mu\iota\varsigma$ – võim; jõud) on füüsika haru, mis uurib energia muundumist ja sellega seotud nähtusi materiaalses maailmas. Seetõttu oleks õigem nimetus termodünaamikale hoopis “energeetika”. Termodünaamika aluseks on *termodünaamika seadused* (nimetatud ka *termodünaamika printsiipideks*), mis postuleerivad, kuidas materiaalsed (s.t füüsikalised) objektid või süsteemid

vahetavad energiat. Ühtlasi näidatakse füüsikalise suuruse olemasolu, mille abil saab sõnastada süsteemide *evolutsiooni* põhimõtteid. Seda suurust nimetatakse *entroopiaks*.

Termodünaamika, uurides objektide ja nende kogumite *interaktsioone* (vastastikuseid mõjutusi), kasutab selleks mõisteid *süsteem* ja *keskkond*.

Süsteem: süsteem (lad k *systema*) on kogum (ehk hulk) objekte, mis moodustavad terviku või mida võib vaadelda kui tervikut ja mis on omavahel interaktsioonis (s.t mille omavahelisi interaktsioone selles käsitluses arvestatakse).

Keskkond: keskkonnaks nimetame vaadeldavat objekti ümbritsevaid teisi objekte. Keskkonna täpne määratlus on valdkonniti erinev. Termodünaamikas mõistetakse termodünaamilise süsteemi keskkonnana kõiki sellest süsteemist väljapoole jäävaid objekte, millega süsteem vahetab ainet ja/või energiat.

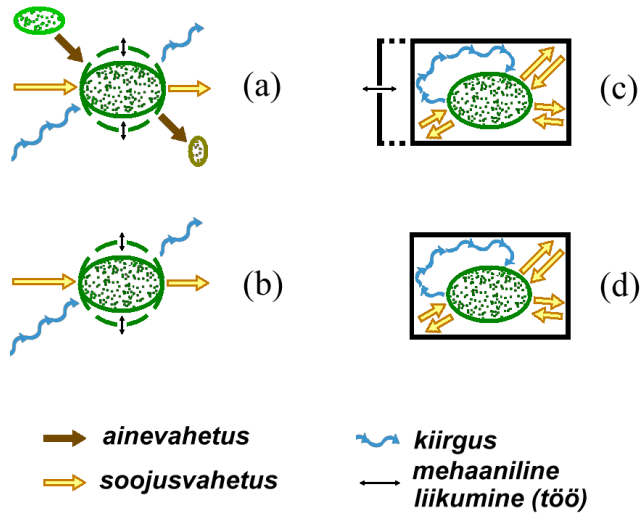
Süsteeme liigitatakse nende ja keskkonna vahelise interaktsiooni alusel järgmiselt (vt joonist 1.1):

Avatud süsteem: avatud süsteem on selline süsteem, mis on aine- ja energiavahetuses oma keskkonnaga. Sealhulgas võib selline süsteem vahetada energiat keskkonnaga ka töö kujul (teha tööd keskkonnajõudude mõjul või keskkonnajõudude vastu).

Kinnine süsteem: kinnine on klassikalises teoorias süsteem, mis vahetab keskkonnaga energiat, kuid mitte (massi omavat) ainet. Sealhulgas võib süsteem teha tööd välisjõudude mõjul või nende vastu.

Adiabaatiliselt isoleeritud süsteem: süsteemi nimetatakse adiabaatiliselt (kr k $\alpha\delta\iota\alpha\beta\alpha\tau\iota\kappa$) isoleerituks, kui see ei saa vahetada keskkonnaga ainet ega energiat muul viisil, kui tehes keskkonnajõudude mõjul või nende vastu mehaanilist tööd.

(Täielikult) isoleeritud süsteem: süsteemi nimetatakse (täielikult) isoleerituks, kui see ei saa vahetada väliskeskkonnaga ainet või energiat ega teha mehaanilist tööd.



Joonis 1.1. Termodünaamiliste süsteemide liike:

(a) – avatud süsteem, (b) – kinnine süsteem,
(c) – adiabaatiliselt isoleeritud süsteem, (d) – isoleeritud süsteem.

Süsteemi kirjeldamiseks kasutatavad suurused jagunevad järgmiselt:

Parameetrid: süsteemi parameetriteks nimetatakse kvantitatiivseid suurusid (füüsikalisi või muid), mille abil väljendatakse süsteemi ajas ja ruumis (suhteliselt) püsivaid omadusi.

Muutujad: muutujad on (füüsikalised või muud) kvantitatiivsed suurused, mida kasutatakse selleks, et kirjeldada objektis (süsteemis) aset leidvaid varieerumisi ajas ja/või ruumis. Mingi(te) suurus(t)e muutumist (varieerumist) ajas nimetatakse *protsessiks*. Kuna termodünaamika objektiks on energiavahetus ja sellega seotud nähtused materiaalses maailmas, siis klassikalise termodünaamika poolt vaadeldavate süsteemide kõige tavalisemad termodünaamilised muutujad on *siseenergia* U , *soojushulk* Q , süsteemi poolt tehtav *töö* A , *temperatuur* T , *rõhk* P , *ruumala* V , *tihedus* ρ , *entroopia* S jm.

Süsteemiga seotud muutujad jagatakse *sise- ja välismuutujateks*:

Sisemuutuja on selline muutuja, mis kirjeldab olukorda süsteemi sisemuses.

Välismuutuja on selline muutuja, mis kirjeldab olukorda keskkonnas.

Muutujad võivad olla ekstensiivsed ja intensiivsed:

Ekstensiivmuutuja: ekstensiivne (ehk *aditiivne*) suurus (seega ka ekstensiivne muutuja) on selline suurus, mille väärtus süsteemi jaoks moodustub kui summa selle muutuja väärtustest süsteemi osade jaoks. Seetõttu sõltub ekstensiivmuutuja väärtus süsteemi suurusel. Näiteks sobivad ruumala V ja mass m .

Intensiivmuutuja: intensiivne suurus (seega ka intensiivne muutuja) on selline suurus, mille väärtus süsteemi jaoks ei kahane süsteemi jagamisel mõttelisteks osadeks otseselt vastavalt osade mahule. Seetõttu ei ole intensiivmuutuja väärtus otseselt sõltuv süsteemi suurusel. Näiteks sobivad temperatuur T ja rõhk P .

Süsteemi olek: olekuks nimetatakse olukorda, mis leiab aset süsteemis. Selle kirjeldamiseks (olekut kirjeldavate muutujate ehk *olekumuutujate* valikuks) on tarvilik valida süsteemi kirjelduse detailsuse tase. Sellise valikuga on määratud olekute diferentseerimine ja vastupidi – olukorrad süsteemis, millele vastab sama olek (olekumuutujate samade väärtuste komplekt), loetakse võrdsesks.

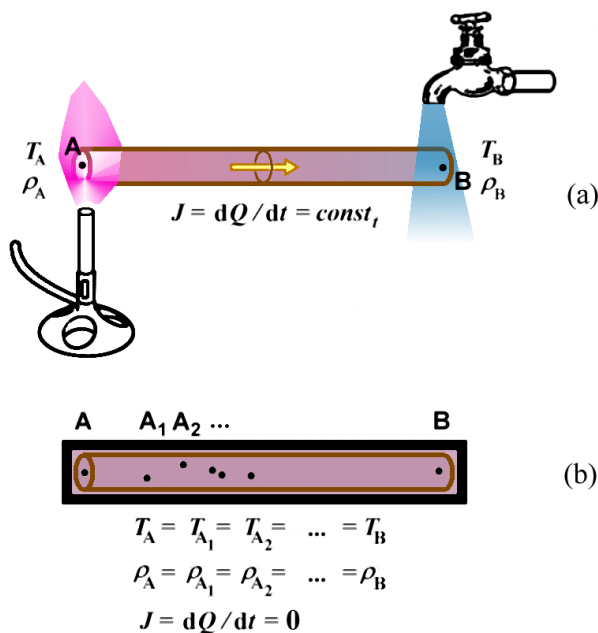
Olekumuutujad: see on tarvilik ja piisav komplekt muutujaid, mille väärtuste teadmine määrab oleku üheselt. Muutujate valikuid sellesse komplekti võib olla mitmeid.

Olekufunktsioon: olekufunktsioon on sõltuv muutuja (matemaatilises tähenduses funktsioon olekust e olekumuutujate komplektist), mis on üheselt määratud süsteemi olekuga ja ainult sellega. Definiitsioonile vastavalt ei sõltu olekufunktsiooni väärtus süsteemi ajaloost, s.t sellest, kuidas süsteem sellesse olekusse on sattunud. Mõned näited: süsteemi olekufunktsioonideks on tema siseenergia U , temperatuur T , rõhk P jm.

Süsteemi olekute seas eristatakse järgmisi erilisi olekuid:

Statsionaarne olek: statsionaarne olek on selline olek, milles oleku-
muutujad on ajas muutumatud (joonis 1.2(a)).

Tasakaaluolek: tasakaaluolek on selline statsionaarne olek, milles
puuduvad aine ja energiavood süsteemi sisemuses ning süsteemi
ja keskkonna vahel. Tasakaaluolekus (joonis 1.2(b)) on kõik in-
tensiivsed muutujad üle süsteemi konstantsed.



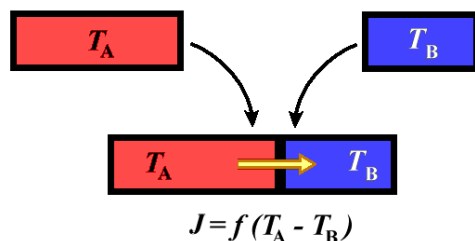
Joonis 1.2. Statsionaarne ja tasakaaluolek:
(a) – statsionaarne protsess, (b) – tasakaaluolek.

Temperatuuri mõiste

Vaadeldgem soojusliku tasakaalu saabumist tegelikkuses. Kui kaks (reaalset) lõplikku süsteemi viiakse soojuslikku kontakti, siis üldjuhul leiavad aset muutused mõlema süsteemi olekutes. Muutused avalduvad muuhulgas ka soojuse ülekandumisena (soojusvoogudena) ühelt

süsteemilt teisele. Lõpuks saabub olukord, milles soojuste vood praktiliselt lakkavad. See ongi soojusliku tasakaalu olukord.

Temperatuuri defineerimise aluse saame nn *termodünaamika 0-ndast seadusest*. Kui kaks süsteemi, A ja B (vt joonist 1.3), on term(odünaam)ilises tasakaalus, siis seda võib väljendada väitega, et neis süsteemides on mingil spetsiifiliselt soojuslikul (termilisel) intensiivmuutujal sama väärtus. Seda muutujat nimetatakse *temperatuuriks* T . Siit järeldub, et kui soojuslik tasakaal ei ole saabunud, siis võib soojusvoo põhjustajana käsitleda just süsteemide A ja B temperatuuride erinevust $T_A - T_B$.



Joonis 1.3. Erinevate temperatuuridega süsteemide soojuslik kontakt. J on sel puhul tekkiv soojusvoog kehade vahel.

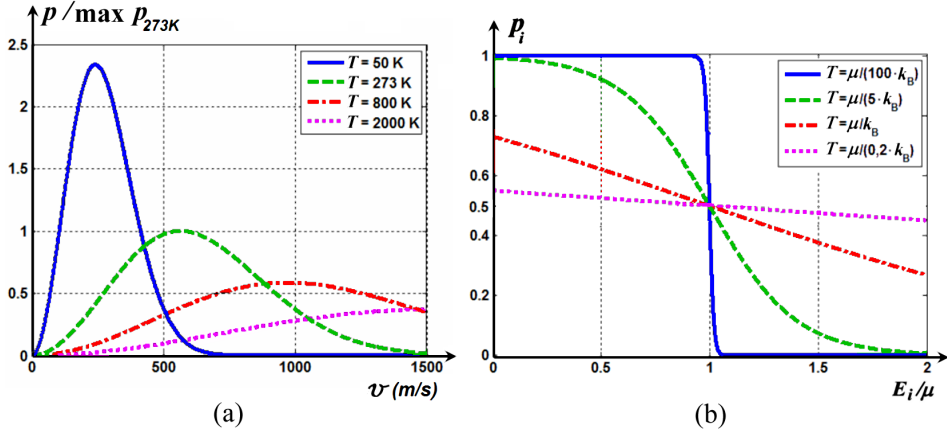
Termodünaamika 0-is seadus väidab:

On võimalik määrata selline suurus T (temperatuur), et soojusvoog J avaldub kui monotoonne matemaatiline funktsioon f temperatuurivahest $(T_A - T_B)$:

$$J = f(T_A - T_B). \quad (1.1.1.1)$$

Siit tuleneb loomulikult, et mistahes monotoonset funktsiooni juba määratud suurusest T võib samuti kasutada temperatuuri mõõduna. Statistilist lähenemisviisi kasutades on näidatud, et süsteemi temperatuur on üksüheselt määratud tema osakeste mikroliikumiste keskmise kineetilise energiaga ühe osakese ühe vabadusastme kohta. Näiteks

kristalses aines on sellisteks mikroliikumisteks aatomite võnkumised, *ideaalses gaasis*¹ – molekulide kulgliikumine.



Joonis 1.4. Temperatuur T füüsikaliste suuruste jaotuste kuju mõjutava parameetrina: (a) – ideaalse gaasi molekulide kiiruste Maxwelli jaotus erinevatel temperatuuridel; (b) – elektroni energianivoo täidetuse tõenäosuse Fermi-Diraci jaotus erinevatel temperatuuridel.

Joonis 1.4 kujutab statistiliste jaotuste tihedusfunktsioone kahe osakesüsteemi – ideaalse gaasi ja aatomituuma ümbritsevate elektronide – kohta. Funktsioonid esitavad ideaalse gaasi juhul molekulide suhtelist arvu kiiruse intervalli kohta $p(v) = dN(v)/dv$, aatomi elektronkate korral elektronide energianivoode $i = 1, 2, 3, \dots$ täidetuse tõenäosust p_i . Temperatuur on siin parameetrik, millest sõltub jaotuskõverate kuju ja seekaudu osakeste keskmine energia.

1.1.2 Klassikaline termodünaamika

Termodünaamika kui teadus kujunes välja XIX sajandil lähtuvalt varasematest füüsika- ja tehnikateadmistest ning selleks ajaks tugevaks kujunenud matemaatilisest mehaanikateooriast. XIX ja XX sajandi

¹ *Ideaalne gaas* on gaasilise aine mudel, mis koosneb hulgast identsetest nullise ruumalaga osakestest, millel puuduvad omavahelised vastasmõjud. Osakeste ainukesed interaktsioonid toimuvad elastsete põrgetena neid ümbritseva anuma seintega.

vahetusel algas termodünaamika arengus statistika kasutuselevõttuga uus etapp. Kuni selleni välja kujunenud termodünaamikat nimetatakse *klassikaliseks termodünaamikaks*.

Klassikalises termodünaamikas arendatav teooria (mida iseloomustatakse epiteediga *fenomenoloogiline*²) käsitleb termodünaamilisi nähtusi tugevalt lihtsustatud mudeli kohaselt. Eelkõige väljendub see asjaolus, et süsteemidele on lubatud vaid tasakaaluolekud. Ka kõiki süsteemides toimuvaid protsesse vaadeldakse tasakaaluprotsessidena – protsessiks selles teoorias on idealiseeritud mudel, mille moodustab reaalse, mittetasakaaluliste olekute asemel tasakaaluolekute jada. Kuna reaalses süsteemis võtaks igasuguse muutuse järel tasakaaluoleku ligikaudnegi saabumine lõpliku aja, siis ideaalse tasakaaluprotsessi vasteks oleks väga aeglaselt toimuv reaalne protsess. Sellele vastavalt ei sisalda klassikaline termodünaamika üldse aja mõistet.

Kuigi klassikaline termodünaamika on tasakaaluliste süsteemide teooria, on temast saadud rohkesti praktikas väga kasulikke tulemusi. Seda teooriat saab rakendada ka piirhinnanguina mittetasakaaluliste olekute kohta: tasakaaluolekute kohta saadava teooria (võrduste vormis esitatav teadmine) kõrval väidetakse siin üht-teist ka mittetasakaaluliste nähtuste kohta (võrratuste vormis).

1.2 Energia ja selle jäävus

1.2.1 Energia, töö ja soojuse mõisted

Seda osa füüsikast, mis tegeleb mehaanikanähtustega, nimetatakse mehaanikaks. Mehaanika on süstematiseeritud ja seostatud kogum teaduslikke mudeleid materiaalse maailma piiratud osa (mida nime-tame mehaanikanähtusteks) kohta. Energia ja töö mõisted ilmusid esmalt mehaanikas.

² *Fenomenoloogiliseks* nimetatakse loodusteadustes teooriat, mis küll suudab kirjeldada vaadeldud nähtusi matemaatika vahendite abil küllaldase täpsusega, kuid ei esita neid seostes või tulenevana üldisematest teooriatest või printsiipidest.

Energia

1807. a võttis inglise füüsik, füsioloog ja egiptoloog Thomas Young kasutusele sõna *energia* (kr k $\varepsilon\nu\varepsilon\rho\gamma\varepsilon\iota$ – tegutsema), millega ta märkis *kineetilist energiat*. Sellelähedast sõna oli oma tekstides kasutanud juba Aristoteles.

Kineetiline energia on üks mitmest füüsika mõistest, mida võib kasutada keha või süsteemi *liikumise mõõduna*. Seejuures kineetiline energia erineb kiirusest ja liikumishulgast esiteks selle poolest, et erinevalt viimati nimetatutest ei kajasta kineetiline energia liikumise suunda (ehk on sellest *sõltumatu*, skalaarne suurus); teiseks mõõdab ta keha võimet teha tööd oma kiiruse tõttu; kolmandaks – ta on jääv üldisematel tingimustel kui kiirus või liikumishulk.

Kineetilist energiat täiendav *potentsiaalne energia* mõõdab keha samasugust võimet teha tööd oma asendi tõttu. Seda võib pidada ka asendisse salvestunud võimaluseks ehk potentsiaaliks liikuda (omandada vastav kineetiline energia).

Mehaaniliseks energiaks nimetatakse nende mõlema energia summat rakendatuna mehaanikanähtuste raames. 1847. a näitas saksa füüsik, füsioloog ja arst Hermann von Helmholtz, et kui mehaanilises süsteemis või sellele toimivad ainult *konservatiivsed jõud* (mittedissipatiivsed ehk mittehajutavad jõud – puudub hõõrdumine, kõik jõud on elastsed), siis on süsteemi mehaaniline energia jääv. Seda võib väljendada ka nii: neil tingimustel on mehaaniline energia mehaanika liikumisvõrrandite esimene integraal.

Konservatiivsete jõudude näiteks on gravitatsioonivälja või elektromagnetvälja jõud. *Dissipatiivseteks jõududeks* võib pidada kõiki jõudusid, mis muudavad makroskoopilise mehaanilise energia kaootilise mikroskoopilise liikumise energiaks (s.t soojuseks). Nisugusteks jõududeks on mitmesugusel kujul hõõrdejõud.

Töö

Termini *töö* võttis 1826. a kasutusele Gaspard-Gustave de Coriolis, prantsuse mehaanik ja matemaatik, et tähistada energiat, mis kehale üle kandub, kui selle liikumine toimub välisjõu mõjul. Kasutame sellise liikumise kohta järgnevas nimetust *aktiivne interaktsioon*.

Termodünaamikas peetakse tööks süsteemi *makroskoopilise* liikumisega seotud energiamuutust. *Tööks ei loeta süsteemi osakeste mikroskoopiliste liikumiste energia muutust. Definitsioonist tulenevalt on töö energia ülekande üks vormidest* ja omab energiaga sama füüsilist dimensiooni (on mõõdetav samades mõõtühikutes).

Keha mehaanilisel kulgliikumisel arvutatakse elementaarne töö dA kui kehale liikumisel mõjuva jõu nihkesuunalise komponendi F ja nihke suuruse dl korrutis: $dA = Fdl$. Üldjuhul on süsteemi elementaarne töö nn *üldistatud jõudude* Y_i ja vastavate *üldistatud koordinaatide* X_i elementaarsete muutuste dX_i korrutiste summa

$$dA \stackrel{def}{=} \sum_i Y_i \cdot dX_i. \quad (1.2.1.1)$$

Üldistatud koordinaatideks X_i on sel puhul mõned süsteemi olekumuutujatest, üldistatud jõud Y_i saavad olla süsteemile väljastpoolt (keskkonnast) toiminud mõjutused, mille tagajärjel üldistatud koordinaadid muutuvad. Mõjutuste kirjeldamiseks kasutatavate suuruste ja vastavate üldistatud koordinaatide korrutis peab muidugi olema töö dimensiooniga. Sobivaks näiteks üldistatud jõu ja vastava üldistatud koordinaadi kohta võivad olla paarid (järjekorras jõud \times koordinaat): rõhk \times ruumala ($P \cdot V$), elektri laeng \times elektriline potentsiaal ($q \cdot \varphi$).

Töö ja energia on skalaarsed suurused (s.t neid kujutavad arvud).

Teame juba, et kineetilist energiat saab pidada üheks süsteemi *liikumise* võimalikest mõõtudest ja potentsiaalset energiat “akumuleeritud” liikumisvõimelisuse samasuguseks mõõduks. Samas võib tööd pidada süsteemi ja keskkonna *makroskoopilise aktiivse interaktsiooni mõõduks*. Tõepoolest, vaatleme valemit (1.2.1.1). Siin summa igas liikmes esitub

elementaarne töö (s.o aktiivse interaktsiooni mõõt) = jõud (s.o interaktsiooni intensiivne mõõt) \times elementaarne üldistatud nihe (s.o interaktsiooni ekstensiivne mõõt).

Selline arusaam aktiivsest interaktsioonist on loomulik – mõlemad tegurid igas summa liikmes, nii jõud Y_i kui ka nihe dX_i , on summa liikme – aktiivse interaktsiooni elemendi – moodustumisel ühtviisi olulised ja seetõttu nad valemis (1.2.1.1) korrutatakse.

Siinkohal võib küsida: mida tähendab see, et töö (aktiivne interaktsioon) ja energia (liikumine) saavad üksteiseks teiseneda? Vas-

tus on: *töö* ja *energia* on vastavalt *aktiivse interaktsiooni* ja *liikumise* teineteisele vastavad *mõõdud*. Nende teineteiseks teisenemise võimalikkusest järeldub, et aktiivsel interaktsioonil ja liikumisel on olemas mõlemale ühine mõõt, mida võime nimetada *energiaks* või *tööks* vastavalt sellele, kas kirjeldame süsteemi olekut või süsteemi ja keskkonna makroskoopilist mehaanilist interaktsiooni.

Seoses meie konspekti objektiga tuleb veel lisada, et töö füüsikaline kontseptsioon ei arvesta töö *kasulikkuse* määraga, ei inimese ega ka teiste elussüsteemide seisukohalt. Füüsikaline töö on elussüsteemi jaoks vaid n-ö “taaramõõt”. Füüsikas ei ole välja arendatud töö “bioloogiliselt efektiivse kvaliteedi” või “elulise kasulikkuse” kontseptsiooni.

Soojuse olemuse ja energia jäävuse kindlakstegemine

Kuni XIX sajandini peeti soojust sarnaseks vedeliku või keemilise ainega. Siiski olid mõnedki molekulaarkineetilist hüpoteesi pooldanud teadlased (nt Daniel Bernoulli, Mihhail Lomonossov) juhtinud tähelepanu selle vaate vastuolule soojuse mehaanilise tekkega, nt suure hõõrdumisega mehaanikatööde juures. Benjamin Thompson (krahv Rumford) avaldas 1798. a Münchenis toimunud kahuritorude puurimise eksperimendi tulemused. Selles aeti 2,5 tunni järel keema vesi anumask, milles toru otsapidi asus. Eksperimendist järeldas ta, et ainuke agent, mis puurimisel kahuritorule üle anti, sai olla liikumine. Eksperiment kinnitas soojuse molekulaarkineetilist õpetust, mõjutas oluliselt soojusõpetuse arengut ja hilisemat jõudmist energia jäävuse seaduseni.

Aastail 1840–1841 võttis saksa arst Julius Robert von Mayer (joonis 1.5) laevaarstina osa reisist Jaava saarele Indoneesias. Ta võttis haigeilt madrustelt veenivere proove. Veeniveri on vähema hapnikusisaldusega ja on seetõttu tumepunane. Jaaval võetud vereproovide veri oli silmatorkavalt hele, mis on troopikapiirkondadele iseloomulik. Mayer tegi järelduse – siin tarbivad inimesed vähem hapnikku kui Euroopas. Mõtlemine selle nähtuse põhjuste üle tõi ta järeldusele, et soojus on üks energia liike. Lõpuks sai Mayerist energia jäävuse seaduse esmasõnastaja (1842). Hiljem arvutas ta *soojuse mehaanilise ekvivalendi*, lähtudes lihtsate gaaside erisoojuste c_p ja c_v erinevusest.

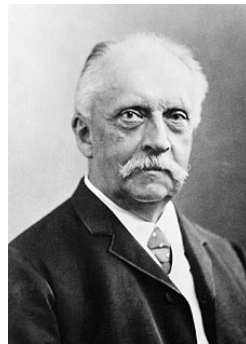
Sarnaseid ideid arendas sõltumatult ka inglise uurija James Joule



Julius Robert v. Mayer
1814–1878, Saksamaa



James Joule
1818–1889, Inglismaa



Hermann v. Helmholtz
1821–1894, Saksamaa

Joonis 1.5. Nemad sõnastasid energia jäävuse.

(joonis 1.5). 1843. a mõõtis ta katseliselt soojust mehaanilise ekvivalendi. Ühtlasi sõnastas ta soojust ja töö ekvivalentsuse (*Joule'i printsiip*), mille kohaselt mehaanilist tööd võib muuta soojuseks ja vastupidi, soojust võib muuta tööks; seejuures annab töö muundamine soojuseks alati töö hulga ühesuguses proportsioonis soojust.

Sellega oli soojus töö vahendusel tunnistanud energia üheks liigiks. Olles matemaatiliselt tõestanud, et mehaaniline energia on liikumisvõrrandite integraal, ja tutvunud Joule'i printsiibiga, avaldas Hermann von Helmholtz (joonis 1.5) oma 1847. a ilmunud raamatus “Über die Erhaltung der Kraft” (*Jõu säilimisest*) Mayeri omaga ideeliselt sarnase deklaratsiooni energia jäävuse kohta kõigis looduses toimuvates protsessides. Soojuse tunnistamine energia liigiks allutas kõik teada olnud mehaanilised ja termodünaamilised muutumised universaalsele energia jäävuse seadusele. Edaspidi nimetati energia jäävus *termodünaamika esimeseks seaduseks*.

Niisiis on *soojus* selline energia, mis kandub keskkonnalt süsteemile või vastassuunas *temperatuuride erinevuse tõttu*.

Soojust ülekande võib toimuda kolmel viisil:

- *kiirguse*,
- *soojusjuhtivuse* ja
- *konvektsiooni* (soojuse ülekande koos aine vahetusega) teel.

1.2.2 Energia jäävus

Jäävusseadustest

Mitmesugused *jäävusseadused* füüsikas (nt massi, kiiruse, liikumishulga jt jäävused, energia jäävus sealhulgas) võimaldavad oluliselt lihtsustada süsteemi käitumisega seotud ülesannete lahendamist tingimustel, et süsteemis vastav jäävus kehtib. Üldiselt on igal jäävusseadusel oma kehtivustingimused. Kui need tingimused on täidetud, siis on võimalik koostada jäävsuuruse kohta võrrandeid, mis väljendavad selle suuruse bilanssi süsteemis, arvestades tema süsteemi sisenemist, sellest väljumist ja selles teisenemist.

Energia jäävus kehtib kõigi materiaalse maailma objektide kohta, sealhulgas ka elusate ja tehislake³ süsteemide kohta.

Prantsuse füüsik, matemaatik ja filosoof Henri Poincaré [21] on 1905. aastal väljendanud mõtte, et kui me avastame kusagil energia jäävuse rikkumise, siis täiendame alati energia mõistet nii, et me saaksime suuruse, mis oleks jääv. Nii lisati näiteks juba XIX sajandil algele mehaanilisele energiale soojus(e energia), seejärel keemiline ja elektromagnetiline energia, XX sajandil – tuumajõudude energiad jne.

“...energia jäävuse printsiip lihtsalt osutab, et on olemas miski, mis püsib muutumatuna. Milliseid iganes uusi teadmisi maailma kohta me ka saaks tulevastest katsetest, teame ette, et on midagi, mis püsib muutumatuna ja mida võime nimetada energiaks. Kas see tähendab, et sellel printsiibil pole mõtet ja see suubub tautoloogiasse? Sugi mitte. See tähendab, et erinevad asjad, millele me anname nimeks energia, on tõepoolest seotud; see kinnitab nende tõelist seost. Kuid seega, kui kõnesoleval printsiibil on mõte, siis võib ta olla ka väär; võib osutuda, et meil pole õigust lõpmatult laiendada selle printsiibi rakendusi. Seega on kindel, et seda printsiipi tuleb hakata kontrollima selle sõna ranges tähenduses. Kuidas me peaksime teadma, millal oleme seda laiendanud lubatava piirini? Lihtsalt siis,

³ *Tehislakeks* nimetame objekte, mis on tekkinud inimeste või muude elusolendite sihipärase tegevuse tagajärjel.

kui see lakkab olemast meile kasulik – s.t kui me ei saa seda enam kasutada uute nähtuste õigeks ennustamiseks.”⁴

1915. aastal arendas saksa matemaatik Emmy Noether edasi Helmholtzi avastust energiast kui liikumisvõrrandite esimesest integraalist. Ta tõestas, et kui süsteemi kirjeldavatel võrranditel on olemas mingi pidev sümmeetria, siis tuleneb sellest vastava jäävusseaduse olemasolu. Noetheri teoreem kehtib kõigi füüsikaseaduste kohta, mille aluseks on nn mõjuprintsiip (lähemalt võib sellega tutvuda õppematerjalis [30]⁵).

Niivõrd kui füüsikaliste süsteemide kohta kehtivad võrrandid ja neis olevad fundamentaalkonstandid on invariantid ajas (s.t võrranditel on pidev sümmeetria aja nihketeisenduse suhtes), järeldub sellest vastav jäävusseadus, milleks sel juhul osutub olevat energia jäävus. Seetõttu kui füüsikaseaduste muutumatust ajas saab pidada universaalselt kehtivaks, peab siis Noetheri teoreemi kohaselt ka energia jäävus olema universaalselt kehtiv looduseadus.

Termodünaamika I seadus

Energia jäävuse seadus on termodünaamika üheks aluseks ja kannab siin *termodünaamika I seaduse* nime. Seaduse formuleerimisel kasutatakse süsteemi siseenergia mõistet.

Süsteemi siseenergiaks (klassikalise termodünaamika kirjanduses tähistatud U -ga) nimetatakse süsteemi kõigi makro- ja mikrotasemete energiatega summat. See hõlmab nii süsteemi makroskoopilist mehaanilist energiat, kõigi süsteemi koostisesse kuuluvate osakeste (molekulide, aatomite, elementaarosakeste jne) liikumise kineetiliste energiatega summat kui ka aine struktuurides sisalduvat elektromagnetilist energiat (nt keemiliste sidemete jm. molekulaarse, aatomi-, elementaarosakeste jne tasemete potentsiaalset energiat; süsteemi sisemuses toimuvates energia kiirgumis- ja neeldumisprotsessides käibivat energiat) ja teisi aine sisemisi energiasid, mis saavad avalduda süsteemi interaktsioonis keskkonna või teiste kehadega.

⁴ Vt http://www.brocku.ca/MeadProject/Poincare/Poincare_1905_11.html lk 166-167.

⁵ Vt http://www.e-oep.ee/_download/euni_repository/file/2217/AM_konspekt.pdf lk 31-43.

Oma koosseisu kuuluvate osade loendamatus tõttu ei ole süsteemi siseenergia väärtus kokkuarvestatav, on võimalik arvestada vaid selle muutusi. Siiski võidakse süsteemi “kogu siseenergiaks” nimetada ka süsteemil mingi absoluutsest nullist erineva temperatuuri juures oleva siseenergia erinevust $T = 0$ K juures olevast siseenergiast.

Siseenergia elementaarseid muutusi saab väljendada summana liidetavatest, mis esitavad seda teiste süsteemi olekumuutujate kaudu. Nii-suguse liidetava näiteks on $dU = P \cdot dV$. Iga selline liidetav on korrutis mingist intensiivmuutujast – üldistatud jõust (siinses näites P) – ja sellega komplementaarse⁶ ekstensiivmuutuja elementaarsest muudust – üldistatud nihkest (näites dV).

On kokku lepitud, et termodünaamilise süsteemi kirjeldamisel

- 1) peetakse soojusvoogu positiivseks, kui selle suund on keskkonnast süsteemile (energia lisandub süsteemile);**
- 2) tööd, mida süsteem teeb välisjõudude vastu (süsteem kulutab energiat töö tegemiseks), peetakse positiivseks.**

Termodünaamika I seadus tõdeb, et energiavahetuses energia ei teki ega kao, vaid selle hulk jääb samaks. Toodud kokkuleppeid arvestades väljendub see järgmise bilansina:

$$Q = \Delta U + A, \quad (1.2.2.1)$$

kus Q on süsteemile antav soojushulk, ΔU on süsteemi siseenergia muutus protsessi käigus, A on süsteemi poolt selles protsessis tehtav töö. Võrdusesse kuuluv soojushulk Q võib tegelikult olla ka süsteemile antava ja süsteemi poolt ära antava soojushulga vahe. Samamoodi võivad ka ΔU ja A olla vastavate suuruste positiivse ja negatiivse muutuse vahed. Seadust võib esitada ka lõpmatult väikeste (*infinitesimaalsete*) muutude kohta:

$$dQ = dU + dA. \quad (1.2.2.2)$$

⁶ Komplementaarseiks (vastastikku täiendavaiks) nimetame siin muutujaid, mille korrutisel on *töö* dimensioon.

Osutub, et iga termodünaamilise süsteemi korral siseenergia U on üks selle süsteemi olekufunktsioonidest (vt lk 7; pange tähele erinevust mõistete *olekufunktsioon* ja *olekumuutuja* vahel!). *Olekufunktsioonid* on sellised muutujad, mis matemaatiliselt on funktsioonid süsteemi olekust ja ainult sellest. Peale olekufunktsioonide esineb süsteemis toimuvate protsesside kirjeldamisel ka niisuguseid muutujaid, mis on määratud mitte ainult süsteemi aktuaalse olekuga, vaid näiteks terve hulga süsteemi viimaste olekutega. Kui süsteemi oleku kirjeldamiseks kasutatavate muutujate – *olekumuutujate* – komplekt on valitud, siis saab olekufunktsiooni matemaatiliseks kirjelduseks mingi matemaatiline funktsioon, mille argumentideks on need olekumuutujad. Kuna oleku määrab üheselt mingi olekumuutujate komplekt, siis peab selleks (s.o olekumuutujateks) olema mingi valik üksteisest *sõltumatutest*⁷ olekufunktsioonidest. Nende muutujate (antud kirjeldustäpsuse korral) piisavat ja tarvilikku arvu nimetatakse *süsteemi vabadusastmete arvuks* ν . Arv ν on (valitud kirjeldustäpsuse korral) ühene, samas pole olekumuutujate valik ühene, vaid olekumuutujaiks võivad olla suvalised ν üksteisest sõltumatut olekufunktsiooni.

Valemissse (1.2.2.1) kuuluvad muutujad Q ja A ei ole süsteemi olekufunktsioonid – mitte kummagi muutus ei ole määratud ainuüksi süsteemi alg- ja lõppolekuga, vaid sõltub ka trajektoorist, mida mööda süsteem algolekust lõppolekusse siirdub. Tihti kasutatakse Q ja A lõpmatult väikeste muutude jaoks tähiseid δQ ja δA , märkimaks, et pole tegemist olekufunktsioonide muutudega.

1.3 Entroopiaseadus

Energia jäävuse seadus ei ole piisav, et valida kõiksuguste mõeldavate protsesside hulgast neid, mis võivad ka tegelikult toimuda. See seadus lubab ka protsesse, mis tegelikkuses aset ei leia. Sellised on näiteks plahvatanud pommi tagasikogunemine plahvatuseelsesse olekusse; vee keemahakkamine klaasis seetõttu, et klaas võtab vajaliku soojust ümb-

⁷ Sõltumatute olekumuutujate komplektiks nimetame sellist olekumuutujate hulka, mis määrab oleku üheselt ja millest ühtegi ei ole võimalik esitada ülejäänute igas olekus kehtiva matemaatilise kombinatsioonina.

ritsevast toatemperatuursest ruumist; lohaka elaniku käes segi läinud toa korrastumine samasuguse eluviisi jätkudes jne. Niisugused võimatud nähtused keelab füüsikas *termodünaamika II seadus*, mida nimetatakse ka *entroopiaseaduseks*.

Entroopiaseadusega on tihedalt seotud protsesside pööratavuse ja mittepööratavuse mõisted. *Pööratavaks* nimetatakse protsessi, mida saab – pärast tema n-ö päripidi toimumist – viia tagasi algolekusse (pöörata) nii, et kokkuvõttes taastatakse ka keskkonna algolek. Pööratavus on, nagu tasakaalulisuski, idealiseeritud omadus, mis saab tege-likkuses realiseeruda vaid ligikaudselt. Protsessi pööratavuseks on selle tasakaalulisus tarvilik. *Ideaalne* tasakaaluprotsess on alati pööratav.

1.3.1 Carnot' teoreem

1824. aastal avaldas noor Prantsuse sõjaväeinsener Sadi Carnot (vt joonist 1.6) uurimuse “Reflexions sur la puissance motrice du feu” (*Arutlused tule liikumapanevast jõust*), mis võttis kokku tema teoreetilise töö aurumasina kohta. Töös tegeldi ideaalse tsüklilise soojusvahetusprotsessiga, milles toodetakse mehaanilist tööd. Uuritud tsükli nimetatakse tänapäeval *Carnot' tsükliks*.

Carnot' lähenemisviis põhines analoogial vesiveskiga (joonis 1.7(a)), ta pidas veskis voolava vee analoogiks soojusmasinas soojusvoogu, mis tekib temperatuuride erinevuse tõttu nagu veevool vesiveskis vee-tasemete erinevuse tõttu. Ta näitas, et tema ideaalse soojusmasina kasutegur on määratud vaid masina soojusreservuaaride temperatuuridega. Carnot' tsükli edasine uurimine Émile Clapeyroni, Rudolf Clausiuse ja William Thomsoni – hilisem lord Kelvin – (vt joonist 1.6) poolt 1830.–1850. aastatel viis entroopiaseaduse formuleerimiseni.

Tsükkel ehk *ringprotsess* leiab aset, kui termodünaamiline süsteem läbib olekute pideva jada, mille lõpus ta pöördub tagasi algolekusse. Süsteem, mis läbib sobivalt organiseeritud tsükli, võib teha tema ümb-ruses olevate objektidega mehaanilist tööd. *Carnot' tsükkel* on selline ringprotsess, mis koosneb kahest isotermilisest⁸ osast ja neid ühenda-vatest adiabaatilistest⁹ osadest (joonis 1.7(b)).

⁸ *Isotermiliseks* nimetatakse protsessi, mis toimub konstantsel temperatuuril.

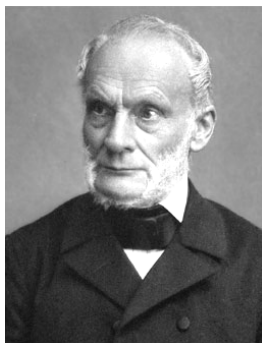
⁹ *Adiabaatiliseks* nimetatakse protsessi, milles ei toimu muud (ei energia- ega aine-) vahetust keskkonnaga kui mehaaniline töö.



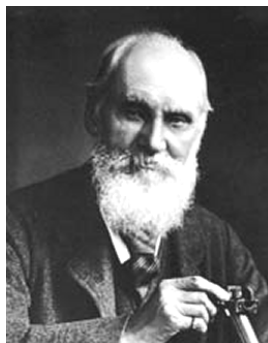
Sadi Carnot
1796–1832, Prantsusmaa



Émile Clapeyron
1799–1864, Prantsusmaa



Rudolf Clausius
1822–1888, Saksamaa



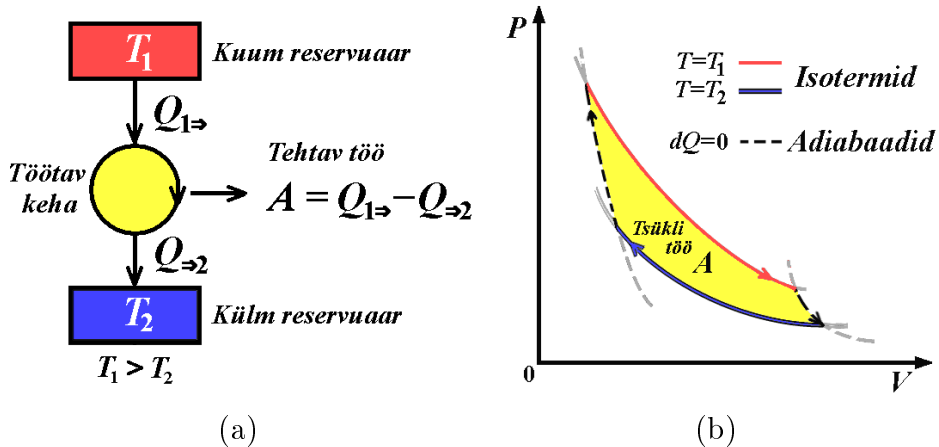
William Thomson, lord Kelvin
1824–1907, Inglismaa

Joonis 1.6. Klassikalise termodünaamika rajajaid.

Tsükli kogu kasulik töö on gaasi paisumisel saadava töö ja gaasi taas kokkusurumiseks kulutatava töö vahe, seetõttu on oluline panna tähele joonisel kujutatud tsükli läbimise suunda. Süsteemis toimivat gaasi vaadeldakse ideaalse gaaasina – see mudel sobib aurumasinat kasutatava ülekuumendatud veeauru kohta hästi.

Soojusmasina tõhusust mõõdetakse tema *kasuteguriga* η :

$$\eta \stackrel{def}{=} \frac{A}{Q_{1\Rightarrow}} = \frac{Q_{1\Rightarrow} - Q_{\Rightarrow 2}}{Q_{1\Rightarrow}}. \quad (1.3.1.1)$$



Joonis 1.7. Soojusmasin ja Carnot' tsüklil:
(a) – soojusmasina struktuur, (b) – Carnot' tsüklil.

Carnot' teoreemi väljendatakse tavaliselt valemiga

$$\eta \equiv \frac{Q_{1\rightarrow} - Q_{\rightarrow 2}}{Q_{1\rightarrow}} \leq \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}. \quad (1.3.1.2)$$

Valemis (1.3.1.2) kehtib võrdusmärk juhul, kui soojusmasin toimib pööratava protsessiga. Juhul, kui protsess masinas toimub mittepööratavalt, on masina kasutegur maksimaalselt võimalikust väikesem ja sellel juhul kehtib valem võrratusmärgiga.

Carnot' teoreem väidab:

Kõigi pööratava protsessiga töötavate soojusmasinate kasutegur on määratud kuuma soojusreservuaari (soojusallika) ja külma reservuaari (jahutaja) temperatuuride suhtega T_1/T_2 ja ainult sellega; kõik sellised masinad on sõltumata töötsükli kompositsioonist sama kasuteguriga, mis võrdub Carnot' tsükli puhul saadavaga.

Kui soojusallikas ja jahutaja on fikseeritud, siis nende vahel toimiva mittepööratava tsükli kasutegur on alati väikesem kui pööratava oma.

Vaatleme veel üht olulist järeldust Carnot' teoreemist. Olgu $Q_{\Rightarrow 2} = 0$, samas kui $Q_{1\Rightarrow} > 0$ – see tähendab, et võetagu soojusallikast soojust ja muudetagu see tööks ilma jahutisse mingit “ülejäaki” andmata. (1.3.1.2)-st saame, et siis peaks $T_2 < 0$. Viimane on aga absoluutse temperatuuri positiivsuse tõttu võimatu. Järelikult on eeldatud olukord võimatu: *ei ole võimalik, et allikast saadav soojus muudetakse tööks jäägitult.*

Viimane väide on samaväärne Kelvini sõnastusega termodünaamika II seadusele.

1.3.2 Entroopiaseaduse ilmumine termodünaamikas

Siirdume järgnevalt lk 21 esitatud termodünaamikas tavakohasele üldisemale kokkuleppele energihulkade märgi kohta energiavahetusel. Joonisel 1.7(a) ühtivad töö ja soojuse ülekande joonisele kantud positiivsest (noolega tähistatud) suundadest kokkuleppe kohastega kaks, kolmas – külmale reservuaarile antav soojus $Q_{\Rightarrow 2}$ – on aga arvestatud vastupidi sellele kokkuleppele.

Valemist (1.3.1.2) näeme:

$$1 - \frac{Q_{\Rightarrow 2}}{Q_{1\Rightarrow}} \leq 1 - \frac{T_2}{T_1}.$$

Võtame nüüd arvesse märgikokkuleppe, tähistame kooskõlas sellega $Q_2 = -Q_{\Rightarrow 2}$ ja jätame teistes tähistustes indeksis märgi \Rightarrow ära. Neis tähistustes võime saadud seose esitada kujul

$$\frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} \leq 0. \quad (1.3.2.1)$$

Siin Q_1 ja Q_2 tähistavad vastavalt süsteemi poolt soojusallikast saadud soojust ja “jahutist saadud” soojust, viimasel on tegelikult negatiivne väärtus. Võrduse vasakut poolt nimetatakse tsükli (*temperatuuriga*) taandatud soojuste summaks. Seoses (1.3.2.1) vastab võrdus pööratavale või ideaalse tasakaaluprotsessi juhule, võrratus aga mittepööratavale ehk mittetasakaaluprotsessi juhule.

Osutub, et (1.3.2.1) sarnane seos kehtib ka mistahes termodünaamilise tsükli kohta.

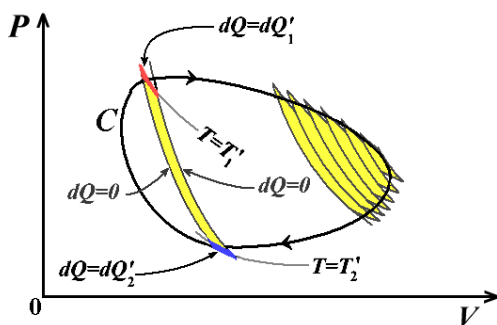
Tõepoolest, olgu suvaline termodünaamiline tsükkel, milles saadakse positiivne töö (pöörake tähelepanu tsükli läbimise suunale!). See tsükkel võib olla jaotatud ribadeks – elementaarselt kitsaste Carnot’ tsüklite massiiviks (joonis 1.8). Tsükli rajajoont lähendab siis joon isothermide ja adiabaatide tükkidest. Sellise massiivi piirväärtuseks riba laiuse lähenemisel 0-le on vaatlusalune tsükkel. Iga elementaartsükli kohta kehtib valem (1.3.2.1) kujul

$$\frac{dQ'_1}{T'_1} + \frac{dQ'_2}{T'_2} \leq 0.$$

Kuna adiabaadid ei panusta soojusvahetusse, siis kogu tsükli taandatud soojuste summa koosneb ainult isothermidel saadavatest liikmetest ja selleks saame

$$\Delta S = \oint_C \frac{dQ}{T} \leq 0, \quad (1.3.2.2)$$

kusjuures kehtib ka toodud võrdus või võrratus. Siin integraal $\oint_C \frac{dQ}{T}$ tähendab integraali üle tsükli suletud kontuuri C .



Joonis 1.8. Suvalise tööd tootva tsükli jagamine elementaarseteks Carnot’ tsükliteks.

Taandatud soojuste integraal valemis (1.3.2.2) pööratava ehk tasakaaluprotsessi juhul osutub olevat üheks termodünaamilise süsteemi olekufunktsioonidest. Seetõttu vääriski see integraal, tollal uue füüsikalise suurusena, erinimetust ja Clausius nimetas selle 1865. aastal

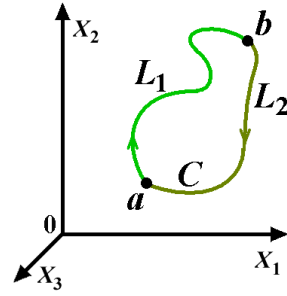
entroopiaks, lähtudes kreeka sõnatüvest $\tau\rho\omicron\pi\eta$ (*muutma*). Niisiis defineeritakse entroopia S lõpmatult väike (ehk infinitesimaalne) juurdekasv dS valemiga

$$dS \stackrel{\text{def}}{=} \left. \frac{dQ}{T} \right|_{\text{rev}}, \quad (1.3.2.3)$$

kus dQ on süsteemile *pööratavalt* (seda märgib tingimus *rev* – *reversible*) üle kanduv soojushulk ja T keha temperatuur, millelt soojus üle kandub.

Veendume, et suurus S on tasakaalulises süsteemis tõepoolest üheks *olekufunktsioonidest*. Kasutame selleks üht klassikalises termodünaamikas enim kasutatud meetodeist – tsüklite meetodit.

Vaatleme süsteemi, milles toimub suvaline positiivse tööga termodünaamiline tsükkel C (joonis 1.9). Siin X_1, X_2, X_3 on olekuruumi koordinaadid ehk olekumuutujad, neid võib olla süsteemi iseärást sõltuvalt ka vähem või rohkem. Märgime selles protsessis kaks olekut – kujutagu neid punktid a ja b . Lähtudes (1.3.2.2)-st, võime kirja panna järgmise avaldiste rea:



Joonis 1.9. Entroopia on olekufunktsioon.

$$\oint_C \frac{dQ}{T} \leq 0 \quad \xrightarrow{1} \quad \int_{L_{1,a \rightarrow b}} \frac{dQ}{T} + \int_{L_{2,b \rightarrow a}} \frac{dQ}{T} \leq 0 \quad \xrightarrow{2} \quad \int_{L_{1,a \rightarrow b}} \frac{dQ}{T} - \int_{L_{2,a \rightarrow b}} \frac{dQ}{T} \leq 0,$$

millest

$$\int_{L_{1,a \rightarrow b}} \frac{dQ}{T} \leq \int_{L_{2,a \rightarrow b}} \frac{dQ}{T} \quad (1.3.2.4)$$

Pöörataval juhul saab selle avaldiste rea läbida lõpuni ja kõikjal ning ka tulemuses (1.3.2.4) kehtib võrdusmärk. Kui tsükli mõlemad

osad L_1 ja L_2 on mittepööratavad, siis peatub võrduste rida enne etappi $\underline{2}$, sest protsess piki teed $L_{2,b \rightarrow a}$ ei ole pööratav (siis ei jõuta ka seoseni (1.3.2.4), sest protsessi $a \rightarrow b$ mööda trajektoori L_2 pole olemas). Kui aga tsükkel on mittepööratav vaid osa L_1 mittepööratavuse tõttu (L_2 on pööratav), siis saab ka nüüd jätkata teisenduste ahelat lõpuni, kuid tsükli kui terviku mittepööratavuse tõttu kehtib võrdlustes võrratusmärk.

Vaatleme kõigepealt järeldusi saadust pöörataval juhul.

Kuna nii tsükli kuju kui ka punktide a ja b valik olekuruumis on suvalised, siis kehtib (1.3.2.4) olekuruumi mistahes punktipaari ja mistahes neid ühendavate teede kohta ning pööratavuse tõttu kehtib selles võrdusmärk, mis tähendab, et kõnesoleva joonintegraali väärtus, olles määratud süsteemi olekutega punktides a ja b , ei sõltu neid olekuid ühendava integreerimistee valikust, ja seda ükskõik millise punktipaari korral olekuruumis. Seega väljendab see joonintegraal sellise suuruse muutust, mis *tasakaaluprotsesside korral* sõltub üksnes olekupunktide asukohtadest olekuruumis – seega taandatud soojuste integraal piki olekuid ühendavaid tasakaaluprotsesse annab olekufunktsiooni muutuse. Sellega on näidatud, et *entroopia muut* ehk *taandatud soojuste integraal* piki olekuid ühendavaid tasakaaluprotsesse (tähistame indeksiga $_{rev}$ – reversible) kuulub termodünaamilise süsteemi olekufunktsioonide hulka.

Võime defineerida *entroopia diferentsi* süsteemi kahe oleku vahel:

$$\Delta S(a, b) \stackrel{def}{=} \int_{L_{a \rightarrow b, rev}} \frac{dQ}{T}, \quad (1.3.2.5)$$

kus süsteemi olekuid a ja b ühendav trajektoor $L_{a \rightarrow b, rev}$ võib olla suvaline trajektoor a -d ja b -d läbivate *tasakaaluliste* (pööratavate) *trajektooride hulgast*.

Valem (1.3.2.5) defineerib entroopia lõpliku diferentsi. Temperatuur T selles sõltub olekutest, mida süsteem läbib siirdumisel olekust a olekusse b ; dQ on sellel siirdumisel süsteemile üle kanduva soojushulga element. Entroopia mõõtühikuks SI-süsteemis on 1 J/K (džaul kelvini kohta).

Tasakaaluprotsessis muutub süsteemi entroopia soojusvahetuse käigus. Soojusvahetus soojusallikaga ($dQ > 0$) suurendab süsteemi en-

troopiat, soojusvahetus jahutajaga ($dQ < 0$) vähendab seda. Tasa-kaalulises ringprotsessis on entroopia muutus null. Entroopia on eksten- siivne suurus.

Mõlema eespool esitatud definitsiooniga oleks termodünaamiline entroopia, sarnaselt siseenergiaga, määratud suvalise konstantse lii- detava täpsusega, s.t oleks võimalik leida vaid entroopia muutusi. Võimaluse leida termodünaamilise entroopia absoluutseid väärtusi an- nab saksa füüsiku Walther Nernsti 1905. a. esitatud *termodünaamika III seadus*, mille kohaselt perfektsete kristallide entroopia $T = 0$ K juu- res on 0. Kui on teada aine molaar-erisoojuse temperatuurisõltuvus $c = c(T)$, saab seetõttu entroopiat mooli kohta (*molaarentroopiat*) s arvutada mitmesugustel temperatuuridel aine jaoks valemist

$$s = \int_0^T \frac{c(T)}{T} \cdot dT. \quad (1.3.2.6)$$

Näiteid ainete molaarentroopiast nn *termodünaamilistes standard- tingimustes* vt tabelist 1.1. Tabel demonstreerib, et eksisteerivad tuge- vad tendentsid: molaarentroopia on vähim tahketel ainetel ja suurim gaasilistel; mida väikesem ja lihtsam on aine antud agregaatoleku kor- ral aine osake, seda väikesem on aine molaarentroopia.

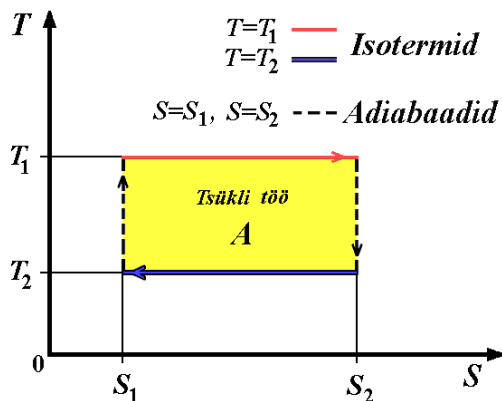
Tabel 1.1. Mõnede ainete molaarentroopiad, $\text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$

($T = 298$ K, $P = 1$ atm)

| Aine | | | Molaar- entroopia | | |
|-------------|-------------------|-------|----------------------|----------------------------------|-------|
| Aine | | | Molaar- entroopia | | |
| Teemant | C | 2,4 | Gaasiline | H ₂ | 130,6 |
| Grafiit | C | 5,7 | Veeaur | H ₂ O | 188,8 |
| Kristalne | Si | 18,8 | Gaasiline | O ₂ | 205,0 |
| Kristalne | Ge | 31,1 | Osoon | O ₃ | 238,9 |
| Metalne | Na | 51,2 | Vedel vesi | H ₂ O | 69,9 |
| Keedusool | NaCl | 72,1 | Vesinikperoksiid | H ₂ O ₂ | 109,6 |
| Metalne | Cu | 33,2 | Metüülalkohol | CH ₃ OH | 126,8 |
| Vasksulfaat | CuSO ₄ | 300,4 | Etüülalkohol | C ₂ H ₅ OH | 160,7 |

Kuna entroopia on termodünaamilise süsteemi olekufunktsioon, siis võib ta olla ka valitud üheks süsteemi olekumuutujatest.

Sel juhul võib ideaalse gaasi tavalise olekumuutujate paari (V, P) , milles on joonisel (1.7) esitatud Carnot' tsükkel, vahetada paariga (S, T) . Neis koordinaatides kujutuvad isotermid sirgjoontena (vt joonis 1.10). Samuti kujutuvad sirgjoontena ka adiabaadid, sest adiabaatilisuse tingimusest $dQ = 0$ saame mittenullistel temperatuuridel (1.3.2.3) kohaselt $dS = dQ/T = 0$. Adiabaati nimetatakse seetõttu ka *isoentroobiks*.



Joonis 1.10. Carnot' tsükkel muutujates (S, T) .

Jooniselt (1.10) on kergesti välja loetav Carnot' poolt saadud avaldis (1.3.1.2).

Termodünaamika II seaduse esimesi sõnastusi

Carnot' tsükli sarnaste protsesside analüüs viis 1850. aastateks *entroopiaseaduse* ehk *termodünaamika II seaduse* sõnastamiseni. Formuleeringuid on mitmetelt uurijatelt ja sama sisu väljendatakse erinevalt. Näiteks Rudolf Clausius sõnastas 1850. a selle nii:

Protsess, mille ainsaks lõpptulemuseks oleks soojuse liikumine antud temperatuuriga kehalt sellest kõrgema temperatuuriga kehale, on võimatu.

William Thomsoni (lord Kelvin) sõnastus 1851. a:

Tsükliline protsess, mille ainsaks lõpptulemuseks oleks kõikjal ühesugust temperatuuri omavast soojusallikast ammutatava soojuse täielik muutmine tööks, on võimatu.

Kujuteldavat viimatinimetatu-laadse tsüklilise protsessiga töötavat masinat nimetatakse ka *teist liiki perpetuum mobile*'ks. Siit ka Wilhelm Ostwaldi¹⁰ kompaktne sõnastus 1877. a:

Teist liiki *perpetuum mobile* on võimatu.

On huvitav tähele panna, et entroopiaseadust on algselt sõnastatud keeluna (nagu energia jäävuse seadustki väljendati esimest liiki *perpetuum mobile* võimatusena).

Erinevad sõnastused esitavad termodünaamika II seadust nähtuna erinevatest vaatekohtadest. Siiski on igast sõnastusest tuletatavad ka ülejäänud kui järeldused.

1.3.3 Entroopia mittetasakaaluprotsessides

Reaalsed protsessid ei ole tasakaalulised ja on mittepööratavad. Kuigi klassikaline termodünaamika tegeleb eelkõige tasakaaluliste protsessidega (olles selles mõttes pigem *termostaatika*), on ta võimeline andma ka piirhinnanguid mittetasakaaluliste ehk mittepööratavate protsesside kohta. Vaatleme järgnevalt *klassikalise termodünaamika poolt antavat hinnangut entroopia muutumisele* sellistes protsessides.

Mittetasakaaluprotsesside korral kehtib seos (1.3.2.4) *range võrratusemargiga*, seejuures võrratuse paremal poolel on taandatud soojuste integraal mittepööratavat protsessi pidi (tähistame indeksiga *irr* – *irreversible*), vasakul poolel aga pööratavat protsessi pidi; mõlemad on muus osas suvalised siirdumised olekust *a* olekusse *b*. Võrratuse

¹⁰ Wilhelm Ostwald (1853-1932), sündis Riias, õppis Tartus ülikoolis, kaitses siin nii magistri- kui doktoritöö, abiellus siin ja on hiljem veidi aega siin töötanud.

vasakul poolel olev integraal on definitsiooni põhjal entroopia muut ja me saame

$$\Delta S(a, b) > \int_{L_{a \rightarrow b, irr}} \frac{dQ}{T}. \quad (1.3.3.1)$$

Oleks vale arvata, et samade olekute a ja b vahelisel mittetasakaalulisel siirdel entroopia muut erineb entroopia muudust tasakaalulisel siirdel. Entroopia on olekufunktsioon ja kui alg- ja lõppolek on samad, siis ka entroopia muut on sama, sõltumata protsessi tüübist. Valem (1.3.3.1) väljendab tõsiasja, et taandatud soojuste arvutamine ja integreerimine mittetasakaaluprotsessides ei anna kokku tegelikku entroopia muutust, samas kui arvutamine ja integreerimine tasakaaluprotsessides annab. Seda tõsiasja võib seletada nii, et mittetasakaaluprotsessil on soojusvahetuse iga etapp tasakaaluprotsessiga võrreldes "lõpuni välja arenemata" – see ei jõua tasakaalustuda. Mittetasakaaluprotsessil vahetab süsteem soojust samade olekute vahel toimuvast tasakaaluprotsessist erinevalt. Võrratusest (1.3.3.1) on näha, et *soojuse saamisel* on mittetasakaaluprotsessil süsteemi poolt saadud taandatud soojuste absoluutkogus *väikesem* kui tasakaaluprotsessil; *soojuse äraandmisel* on mittetasakaaluprotsessil süsteemi poolt ära antud taandatud soojuste absoluutkogus *suurem* kui tasakaaluprotsessil – mittetasakaaluline *soojusvahetus* on võrreldes tasakaalulisega "kallutatud" soojusenergia madalamatemperatuuriliseks degradeerumise poole ja tekitab entroopiat.

Mittetasakaalulises protsessis tasakaalustumata (ühtlustumata) jääv soojuse jääkjaotus väljendub entroopia täiendava kasvuna, võrreldes samade olekute vahel toimuva tasakaalulise protsessiga. Tõepoolest, (1.3.3.1) parema poole võib täiendada võrduseni:

$$\Delta S(a, b) = \int_{L_{a \rightarrow b, irr}} \frac{dQ}{T} + \Delta S_{gen, irr}, \quad (1.3.3.2)$$

kus $\Delta S_{gen, irr}$ väärtus on täpselt teadmata, kuid ilmselt peab kehtima $\Delta S_{gen, irr} > 0$.

Tekitatud võrduse paremal poolel olev esimene liidetav on *mittetasakaalutrajektoori* pidi leitud taandatud soojuste integraal süsteemi

siirdumisel olekust a olekusse b (see on olekute a ja b entroopia diferentsist väikesem), teine liidetav $\Delta S_{gen,irr}$ tähistab mittetasakaalulisusest tingitud *entroopia teket süsteemis* sellel siirdumisel. Et nende kahe liidetava summa annab entroopia diferentsi olekute a ja b vahel (vaatleme ju protsessi, milles süsteem *jõudis* olekusse b), siis näeme, et mittetasakaaluprotsessis on süsteemi entroopia muutumiseks võimalikud kaks mehhanismi:

- 1) soojusvahetus (sellele vastab esimene liidetav valemis (1.3.3.2)) ja
- 2) *entroopia teke* siirdumise mittetasakaalulisuse tõttu (teine liidetav valemis (1.3.3.2)).

Soojusvahetus soojusallikaga ($dQ > 0$) suurendab süsteemi entroopiat, soojusvahetus jahutajaga ($dQ < 0$) vähendab süsteemi entroopiat. *Entroopia tekke* korral saab süsteemi entroopia vaid kasvada. Summaarselt võib soojusvahetus jahutajaga olla ka ülekaalus ja põhjustada süsteemi entroopia vähenemise. Süsteemi poolt tehtav või süsteemile rakendatav *makroskoopiline mehaaniline töö* ei muuda süsteemi või keskkonna entroopiat otseselt (töö ei kuulu seostesse (1.3.3.1), (1.3.3.2)). Termodünaamikas on töö süsteemi energiavahetus keskkonnaga *konservatiivsete jõudude* toimet. See on idealiseeritud olukord, mil puudub hõõrdumine ja sellega seotud hajusoojus. Selline protsess on pööratav ja selles entroopia *ei teki*. (Töö dissipatiivsete jõudude vastu on lahutatav konservatiivsete jõudude tööks ja hajusoojuse tekkeks nt Joule'i poolt käsitletud mehhanismide kaudu.)

Kui on tegu lõpmatult väikese ulatusega (infinitesimaalse) mittetasakaaluprotsessiga, siis saame võrratusest (1.3.3.1)

$$dS > \frac{dQ}{T} \Big|_{irr}. \quad (1.3.3.3)$$

Sama sisu ilmekama väljenduse saame võrduse (1.3.3.2)) diferentseerimisel:

$$dS = \frac{dQ}{T} \Big|_{irr} + dS_{gen,irr}, \quad (1.3.3.4)$$

kus infinitesimaalsel mittetasakaalulisel siirdumisel on $dS_{gen,irr} > 0$.

Võrdused ja võrratused (1.3.3.1), (1.3.3.2) ja (1.3.3.3), (1.3.3.4) kujutavad endast *piirhinnanguid*, mida klassikaline termodünaamika

annab entroopia muutuse kohta reaalses (mittetasakaalulistes, mittepööratavates) protsessides.

Vaatleme nüüd erijuhuna entroopia muutumist *adiabaatiliselt isoleeritud või isoleeritud süsteemis*. Neil juhtudel $dQ = 0$ ja valemitest (1.3.2.3), (1.3.3.3) saame vastavalt

$$dS|_{rev,adiab} = 0, \quad (1.3.3.5)$$

$$dS|_{irr,adiab} > 0. \quad (1.3.3.6)$$

Kui selline süsteem on mittetasakaalulises olekus, siis edasi toimub (1.3.3.6) kohaselt süsteemi entroopia kasvamine. Kui aga süsteemi olek on tasakaaluline, siis (1.3.3.5) kohaselt süsteemi entroopia jääb muutumatuks.

Siit tuleneb tähtis järeldus, mis on ühtlasi kõige tuntumaks *termodünaamika II seaduse sõnastuseks*:

Isoleeritud (või adiabaatiliselt isoleeritud) süsteemi entroopia kasvab ja saavutab oma maksimaalse väärtuse.

Kui süsteem on (adiabaatilisse) isolatsiooni sattumise hetkel tasakaalust eemal, siis võivad selles edasi toimuda tasakaalustumisprotsessid, mille käigus entroopia saab ainult kasvada. Kui neis protsessides jõutakse tasakaalu lähedale, siis protsessid aeglustuvad kuni peatumiseni, misjärel entroopia jääb püsima oma lokaalsel maksimumväärtusel. Isoleeritud süsteemi *evolutsioon* toimub tasakaaluoleku poole, mis ka mõne aja (mõnikord lühikese, mõnel juhul ka pika) järel mingisuguse täpsusega saabub. Tasakaalustunud isoleeritud süsteemis puuduvad täielikult mistahes makroskoopilised protsessid. Hinnangut tasakaalu saabumise kiiruse kohta ei suuda klassikaline termodünaamika anda.

Entroopia, nagu energiagi, ei ole hävitatav. Erinevalt energiast maailma¹¹ entroopia aina kasvab reaalses protsessides mittetasakaalu-

¹¹ *Maailm ehk universum* on termodünaamikas tihti kasutatav termin, mis tähistab vaadeldavat süsteemi koos teda ümbritsevate objektidega (ehk keskkonnaga), millega ta on vastasmõjus. Termodünaamika kui mudeli piiratuse tõttu ei või seda terminit mõista sõna-sõnalt.

lisuse tõttu:

$$dS|_{\text{reaalprotsess}} > 0. \quad (1.3.3.7)$$

Õeldu põhjal võib mõista Clausiuse 1865. aastal esitatud väidet: “Universumi entroopia kasvab maksimumi poole,” milles ta rakendas kogu kosmilisele universumile isoleeritud süsteemi kohta selgunud tõsiasja. Sarnasel seisukohal oli ka Kelvin, kes esitas sellest lähtunud universumi tuleviku stsenaariumi, mida hakati nimetama “Universumi soojussurmaks”. Neid ideid tuleb siiski pidada mudeli ekstrapolatsiooniks koos kõigi ekstrapolatsioonidele omaste puudustega. “Soojussurmaga” seoses on toimunud ka ägedaid filosoofia valda kuuluvaid väljaastumisi. Tänapäevaks on selgunud mitmeid uusi asjaolusid, mis võimaldavad ka teistsuguseid vaateid, kui olid Clausiusel ja Kelvinil.¹²

Klassikalise termodünaamika rakendustest

Klassikaline termodünaamika võimaldab arvutada termodünaamiliste ja muude füüsikaliste suuruste väärtusi tasakaaluolekute jaoks. Seda tehakse, rakendades süsteemide *tasakaalutingimusi*.

Entroopia S on selline olekufunktsioon, mis võimaldab väljendada tasakaalutingimust ja *evolutsioonikriteeriumi*¹³ *isoleeritud ja adiabaatiliselt isoleeritud* süsteemide jaoks. Nende süsteemide evolutsioon toimub nii, et neis

$$S \rightarrow \max S. \quad (1.3.3.8)$$

Helmholtzi vabaenergia F on termodünaamilise süsteemi olekufunktsioon, mis defineeritakse kui

$$F \stackrel{\text{def}}{=} U - T \cdot S. \quad (1.3.3.9)$$

Ta võimaldab esitada tasakaalutingimuse ja saada evolutsioonikriteeriumi selliste *kinniste süsteemide* jaoks, mille temperatuur T ja ruumala V hoitakse konstantsed, samas kui soojuse ja töö vahetus

¹² *Universumi soojussurma* probleemi kohta vt Wikipediast [34]
http://en.wikipedia.org/wiki/Heat_death_of_the_universe

¹³ Süsteemi *evolutsioonikriteeriumiks* nimetatakse tingimust, mille järgi või mille täidetuse poole liigub süsteem oma arengus.

keskkonnaga saab toimuda. Selliste süsteemide evolutsioon toimub nii, et neis

$$F \rightarrow \min F. \quad (1.3.3.10)$$

Gibbsi vabaenergia G

$$G \stackrel{def}{=} F - P \cdot V \quad (1.3.3.11)$$

võimaldab esitada tasakaalutingimuse ja evolutsioonikriteeriumi selliste *kinniste süsteemide* jaoks, mille rõhk P ja ruumala V hoitakse konstantset (samas kui soojuse ja töö vahetus keskkonnaga saab toimuda):

$$G \rightarrow \min G. \quad (1.3.3.12)$$

Termodünaamilise süsteemi tasakaalustumisprotsessi tulemused võivad pakkuda suurt praktilist huvi. Tasakaalutingimused võimaldavad näiteks arvutada keemiliste reaktsioonide (sealhulgas elussüsteemides toimuvate biokeemiliste reaktsioonide) lähteainete ja produktide tasakaalulisi hulki, aine jaotumist füüsikalise oleku faaside vahel jms. Need on klassikalise tasakaalulise termodünaamika suure tähtsusega tulemused.

Peatükk 2

Entroopia statistilisest tähendusest

2.1 Entroopia statistiline tõlgendus

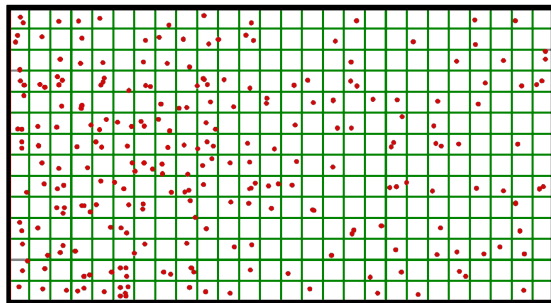
1860.–1870. aastatel asus austria füüsik Ludwig Boltzmann (vt lk 50, joonis 2.5) esmakordselt üritama leida fenomenoloogilisele entroopiaseadusele põhjendust statistika meetodite abil. Tema õnnestunud katse põhines soojuse molekulaarkineetilisel mudelil ja atomistlikul matemaatilise statistika põhisel lähenemisel. Atomism polnud tollal sugugi üldtunnustatud lähenemisviis aine ehitusele – oli olemas tugev koolkond teadlasi (näiteks kuulus nende hulka ka W. Ostwald), kelle arvates aatomid ja molekulid olid vaid sobivalt valitud formaalne lihtsustus teoorias. Oma töödega algatas Boltzmann uue teadusharu – *statistilise termodünaamika*.

2.1.1 Boltzmanni idee

Boltzmanni idee kasvas välja sarnasuse märkamisest mittetasakaalulise algolekuga isoleeritud termodünaamilise süsteemi entroopia kasvamise ja üksi jäetud süsteemi loomuliku siirdumise vahel väikese tõenäosusega olekust olekusse, mille tõenäosus on suurem.

Joonis (2.1) on abiks selle idee selgitamisel. Olgu vaadeldavaks süsteemiks termodünaamilises mõttes isoleeritud (seega ka muutumatu ruumalaga) anum, mis on täidetud ideaalse gaasiga. *Ideaalne*

gaas on hõreda molekulaarse aine mudel. See koosneb suurest arvust osakestest (molekulidest), mis ei ole üksteisega vastasmõjutuses, võivad oma liikumisel vaid elastselt põrkuda anuma seintega. Isoleeritud kogus ideaalset gaasi on üks statistilise termodünaamika kõige lihtsamaid mudelobjekte.



Joonis 2.1. Osakeste süsteemi mudel: ideaalne gaas isoleerivas anumas; Γ raku ja N molekuli, kõigil võrdne tõenäosus paiknemiseks igas rakus.

Kui süsteemi oleku teadmist mõista kõigi molekulide individuaalsete asukohtade ja kiiruste teadmisena, siis võiks süsteemil olla lõpmatu arv olekuid. Igaühte sellistest olekutest nimetame süsteemi *mikroolekuks*. Süsteemi *makroolekud*, mida saab kirjeldada makroskoopiliste muutujatega – ideaalse gaasi puhul nt olekumuutujate paariga (V, T) , saadakse mikroolekute keskmistamise tulemusena. Makroskoopiliselt paistab sama olekuna igaüks hiigelsuurest hulgast veidi erinevatest mikroolekutest.

Lihtsustame olukorra kirjeldust, et demonstreerida Boltzmanni idee päritolu selleks vajalikku mudelit arvutuslikult liialt komplitseerimata: piirdume gaasi oleku kirjeldamisega vaid osakeste asukohtadega, jättes kiiruste erinevused arvestamata. Järgmise lihtsustusena asendame pideva ruumi diskreetsega – olgu ruum jaotatud võrdseteks rakkudeks. Molekuli asukohta määrame raku täpsusega. Olgu ruum 2-mõõtmeline – juba tehtud lihtsustuste korral ei kitsenda see mudeli üldisust.

Valime kirjelduse detailsuse määra sellise, et süsteemi makroolekut iseloomustaks molekulide kontsentratsioon (molekulide arv ruumalaühiku kohta) jaotus anumas. Kõigil osakestel on ühtmoodi võrdne tõenäosus olla igas rakus. Rakkude arv olgu Γ , molekulide arv N . Siis

on *makrooleku* kirjelduseks piisav, kui anda rakkude asustustiheduse vektor $\mathbf{n} = (n_1, n_2, \dots, n_\Gamma)$, milles n_i ($i = 1, 2, \dots, \Gamma$) on osakeste arv i -ndas rakus. Ilmselt kehtib

$$N = \sum_{i=1}^{\Gamma} n_i. \quad (2.1.1.1)$$

Mikrooleku võib kirjeldada molekulide aadresside vektoriga $\mathbf{a} = (a_1, a_2, \dots, a_N)$, milles a_j on aadress (raku number), milles asub j -is molekul.

Makrooleku realiseerumise tõenäosus on määratud selliste erinevate mikroolekute arvuga W , millest igaüks makroskoopiliselt vaadelduna tekitab selle makrooleku. Arvu W nimetatakse vastava makrooleku *statistiliseks kaaluks* ehk *termodünaamiliseks tõenäosuseks*.

Kombinatorikas (vt J. ja Ü. Kaasiku õpikut [11]) on ülesanne, mis annab meid huvitava arvu. Makroolekule asustustihedusega $\mathbf{n} = (n_1, n_2, \dots, n_\Gamma)$ vastava mingi mikrooleku saamiseks tuleb N nummerdatud molekuli paigutada aadressidele $\mathbf{a} = (a_1, a_2, \dots, a_N)$ nii, et samu aadresse tuleb molekulide paigutamiseks kasutada *korduvalt*, kooskõlas \mathbf{n} -vektoriga, kuid samale aadressile paigutuvate molekulide järjestust ei arvestata. Kui üks selline N molekuli paigutus on leitud, siis molekulinumbrate poolest erinevad, kuid sama struktuuriga paigutused saadakse sellest *kordumistega permutatsioonide* abil. Kordumistega permutatsioonide arv $P_N^{(n_1, n_2, \dots, n_\Gamma)}$ ongi makrooleku statistiline kaal ja see avaldub meie tähistustes nii:

$$W(n_1, n_2, \dots, n_\Gamma) = P_N^{(n_1, n_2, \dots, n_\Gamma)} = \frac{N!}{n_1! \cdot n_2! \cdot \dots \cdot n_\Gamma!}. \quad (2.1.1.2)$$

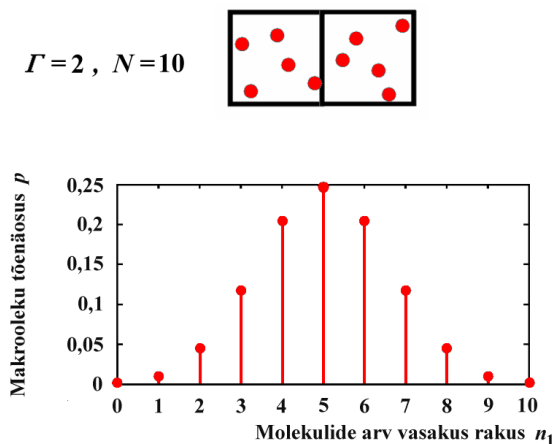
Süsteemi kõigi võimalike mikroolekute koguarv M on Γ võimalikust aadressist N molekulile valitavate aadresside erinevate valimite arv. Valimite koostamisel tuleb lubada aadresside kordumisi ja eristada molekule. Kombinatorikas vastab sellele kordumistega variatsioonide arv A_Γ^N :

$$M = A_\Gamma^N = \Gamma^N. \quad (2.1.1.3)$$

Siis makrooleku, mille koostis on $\mathbf{n} = (n_1, n_2, \dots, n_\Gamma)$, esinemise (harilik) tõenäosus on

$$p(n_1, n_2, \dots, n_\Gamma) = \frac{W(\mathbf{n})}{M} = \frac{N!}{n_1! \cdot n_2! \cdot \dots \cdot n_\Gamma!} \cdot \frac{1}{\Gamma^N} \quad (2.1.1.4)$$

Joonisel (2.2) on makroolekute esinemistõenäosuste jaotus 10 molekulist koosnevas süsteemis, kui anum gaasiga on jagatud vaid kaheks ühesuguseks osaks.



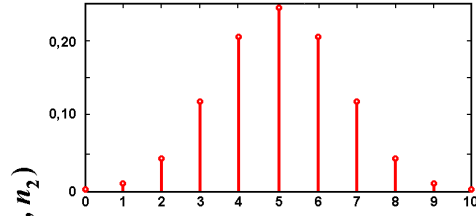
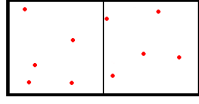
Molekulide jaotumise tõenäosused juhul $\Gamma=2, N=10$.

| n_1 n_2 | 0 10 | 1 9 | 2 8 | 3 7 | 4 6 | 5 5 | 6 4 | 7 3 | 8 2 | 9 1 | 10 0 | n_1 n_2 |
|----------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|----------------|
| p | $\frac{1}{1024}$ = 0.00098 | $\frac{10}{1024}$ = 0.0098 | $\frac{45}{1024}$ = 0.0439 | $\frac{120}{1024}$ = 0.117 | $\frac{210}{1024}$ = 0.205 | $\frac{252}{1024}$ = 0.246 | $\frac{210}{1024}$ = 0.205 | $\frac{120}{1024}$ = 0.117 | $\frac{45}{1024}$ = 0.0439 | $\frac{10}{1024}$ = 0.0098 | $\frac{1}{1024}$ = 0.00098 | p |

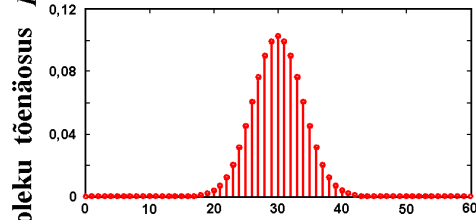
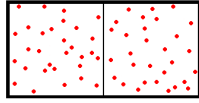
Joonis 2.2. Makroolekute tõenäosused ideaalses gaasis. $\Gamma=2, N=10$.

Joonisel (2.3) on valemiga (2.1.1.4) saadud makroolekute esinemistõenäosuste jaotused $N = 60$ ja $N = 150$ molekulist koosnevas süsteemides, kui anum on mõtteliselt jagatud kaheks osaks. On näha, et jaotuse suhteline laius ehk suhteline hälbumine tõenäolisest makroolekust väheneb molekulide arvu N suurenemisel.

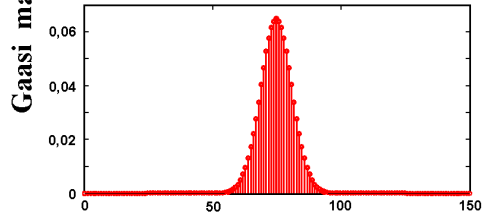
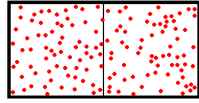
$\Gamma = 2$, $N = 10$



$\Gamma = 2$, $N = 60$



$\Gamma = 2$, $N = 150$



Molekulide arv n_1 vasakus rakus

Joonis 2.3. Makroolekute tõenäosuste jaotuse muutumine molekulide arvu suurendamisel.

Osakeste suure arvu korral on otstarbekas arvutustel kasutada logaritmimist. Siin osutub arvutuste lihtsustamiseks kasulikuks Stirlingi lähendusvalem¹, mis annab faktoriaali logaritmile hea lähendi:

$$\ln(n!) \approx n \cdot (\ln n - 1). \quad (2.1.1.5)$$

Kasutades Stirlingi valemit (2.1.1.5), võib (2.1.1.2) arendada kujule

¹ Täpsemalt – see on Stirlingi täpse valemi logaritmilise kuju peamine osa, vt I. Piiri õpikut [20].

$$\begin{aligned}\ln W(n_1, n_2, \dots, n_\Gamma) &\approx N \cdot \ln N - N - \sum_{i=1}^{\Gamma} n_i \cdot \ln n_i + \sum_{i=1}^{\Gamma} n_i = \\ &= C_W(N) - \sum_{i=1}^{\Gamma} n_i \cdot \ln n_i\end{aligned}$$

ehk kokkuvõttes

$$\ln W(n_1, n_2, \dots, n_\Gamma) \approx C_W(N) - \sum_{i=1}^{\Gamma} n_i \cdot \ln n_i, \quad (2.1.1.6)$$

kus $C_W(N) = N \ln N$. Tõenäosuse p jaoks saame eelmisest vaid liidetava konstandi $C_p(N, \Gamma) = N \ln \frac{N}{\Gamma}$ poolest erineva valemi:

$$\ln p(n_1, n_2, \dots, n_\Gamma) \approx C_p(N, \Gamma) - \sum_{i=1}^{\Gamma} n_i \cdot \ln n_i. \quad (2.1.1.7)$$

Funktsiooni $\sum_{i=1}^{\Gamma} n_i \cdot \ln n_i$ maksimum on kohal, kus kõik n_i -d on võrdsed², s.t molekulide jaotus ruumis on ühtlane: $n_i = N/\Gamma$. Konstant $C_W(N)$ on suur positiivne arv. Hindame W maksimaalset väärtust.

$$\begin{aligned}\ln W(n_1, n_2, \dots, n_\Gamma) &\approx C_W(N) - \sum_{i=1}^{\Gamma} n_i \cdot \ln n_i \leq \\ &\leq N \ln N - \sum_{i=1}^{\Gamma} \frac{N}{\Gamma} \cdot \ln \frac{N}{\Gamma} = \\ &= N \ln \Gamma = \ln \Gamma^N = \ln M,\end{aligned}$$

² Selles saab veenduda mitme muutuva funktsiooni $f(n_1, n_2, \dots, n_\Gamma) = \sum_{i=1}^{\Gamma} n_i \cdot \ln n_i$ ekstreemumi leidmisega lisatingimusel $\sum_{i=1}^{\Gamma} n_i = N$, kasutades Lagrange'i meetodit. Vt R. Mankini ja E. Reiteri õpikut [14].

kus võrdluses saaks ligikaudne võrdus kehtida vaid W maksimumile vastava makrooleku ja sellelähedase suhteliselt kitsa piirkonna korral. Tulemus ütleb, et *suure molekulide arvu N korral on süsteemi tõenäolisemat makroolekut realiseerivate mikroolekute arv niivõrd suur, et see peaaegu võrdub süsteemi kõigi mikroolekute arvuga:*

$$\mathbf{max} W \lesssim M. \quad (2.1.1.8)$$

Ülesanne 1

Veenduge iseseisvalt, et eespool määratud konstant C_p tagab makrooleku tõenäosusele väärtuse loomulikes piirides $0 \leq p \leq 1$.

Ülesanne 2

Uurime makrooleku esinemistõenäosuse muutumist, kui makroolek hällbib kõige tõenäolisemast. Makrooleku tõenäosuse muutus sel puhul on leitav valemi (2.1.1.4) abil.

Olgu isoleeritud anum as 1 mool ehk $N = N_A \approx 6 \cdot 10^{23}$ molekuli eespool kirjeldatud lihtsustatud mudelgaasi. Jagame gaasi anuma kaheks võrdseks mõtteliseks osaks. Leiame, mitu korda on tasakaalulise oleku tõenäosus suurem kui sellise makrooleku tõenäosus, milles gaas oleks osaruumalades tasakaalulisest erineva keskmise tihedusega – ühes $\alpha = 1/1\,000\,000$ võrra hõredam, teises samapalju tihedam.

Lahendus

Vastav statistilise kaalu logaritmi muutus on

$$\Delta(\ln W) = \ln W_2 - \ln W_1 = \ln \frac{W_2}{W_1} = \ln \frac{p_2}{p_1},$$

kus indeks 1 märgib osakeste võrdse jaotuse juhtu, indeks 2 märgib võrdsest jaotusest kõrvalekaldumise (fluktuatsiooni) juhtu. Siis gaasis, mis on makroskoopiliselt termodünaamilises tasakaalus, oleks selline fluktuatsioon p_1/p_2 korda vähem tõenäoline kui võrdne täitumine.

$N = 6 \cdot 10^{23}$, $\Gamma = 2$, $\alpha = 10^{-6}$. Teeme valemi (2.1.1.4) järgi arvutuse:

$$\Delta(\ln p) = \Delta(\ln W) \approx 2 \cdot \frac{N}{2} \cdot \ln \frac{N}{2} - \\ - \frac{N}{2} \cdot (1 - \alpha) \cdot \ln \left[\frac{N}{2} \cdot (1 - \alpha) \right] - \frac{N}{2} \cdot (1 + \alpha) \cdot \ln \left[\frac{N}{2} \cdot (1 + \alpha) \right].$$

Tulemuseks on

$$\Delta(\ln p) \approx -3,01 \cdot 10^{11}, \quad \text{siit } p_1/p_2 = e^{3,01 \cdot 10^{11}} \approx 10^{130\,000\,000\,000}.$$

See on tohutult suur arv. Uuritud fluktuatsioon on tasakaaluolekuga võrreldes *tühiselt väikese tõenäosusega*.

Ülesanne 3

Olgu isoleeritud anum as 1 mool eespool kirjeldatud lihtsustatud mudelgaasi. Jagame gaasi anuma 1 000 000 võrdseks mõtteliseks rakuks. Leidke, mitu korda kahaneb makrooleku tõenäosus võrreldes tasakaalulisega, kui gaasi tihedus erineks tasakaalulisest väärtusest vaid kaheks neist rakkudest, olles ühes $\alpha = 1/1\,000\,000$ võrra tasakaalulisest suurem, teises samapalju väiksem.

$$\text{Vastus: } p_1/p_2 = e^{5,98 \cdot 10^5} \approx 10^{260\,000}.$$

Seegi on tohutult suur arv. Uuritud fluktuatsioon on küll palju tõenäolisem kui eelmisena vaadeldu, kuid siiski tasakaaluolekuga võrreldes äärmiselt vähetõenäoline.

Käsitletud näiteülesanded demonstreerivad, et tasakaaluolek, mille poole isoleeritud süsteem evolutsioneerub klassikalise termodünaamika kohaselt, on statistiliste arvutuste kohaselt sellise süsteemi kõige tõenäolisem olek. Statistika pakub meetodeid, millega seletada termodünaamikas ilmsiks tulnud entroopilisi tendentse.

2.1.2 Boltzmanni entroopiavalem

Isoleeritud ja tasakaaluoleku lähisel olevate termodünaamiliste süsteemide kohta, milles kõik mikroolekud esinevad võrdse tõenäosusega,

kehtib nn *Boltzmanni entroopiavalem*

$$S = k_B \cdot \ln W, \quad (2.1.2.1)$$

kus S on süsteemi entroopia vaadeldavas makroolekus, W on selle makrooleku statistiline kaal ja k_B on fundamentaalne konstant, mida nimetatakse *Boltzmanni konstandiks*.

Kuigi Boltzmann sidus entroopia tõenäosusega juba 1866. a, on selle põhimõtte valemina (2.1.2.1) vormistanud ja ka nimetuse “Boltzmanni konstant” esmakordselt kasutusele võtnud saksa füüsik Max Planck 1906. aastal (samal töös musta keha kiirgusest, millest sai alguse kvantteooria).

Vaatleme tuletuskäiku sellele valemile [20].

Eeldus: Isoleeritud tasakaalulähise süsteemi entroopia S ja makrooleku termodünaamiline tõenäosus W on seotud mingi monotoonse matemaatilise funktsiooni f kaudu:

$$S = f(W). \quad (2.1.2.2)$$

Eesmärk: Leiame selle funktsiooni.

Selleks vaatleme süsteemi A , mis koosneb kahest nõrgalt vastasmõjutuvast osast B ja D (joonis 2.4): $A = B \cup D$. Kuna entroopia S on ekstensiivne muutuja, siis peavad vastavad osa-entroopiad summeeruma: $S_A = S_B + S_D$, siit kooskõlas eeldusega

$$f(W_A) = f(W_B) + f(W_D). \quad (2.1.2.3)$$

Teisest küljest, süsteemi A iga mikroolek on alamsüsteemi B mikrooleku ühendus alamsüsteemi D mikroolekuga. Kuna viimaste mikroolekud on sõltumatud (B ja D vastasmõju on nõrk), siis süsteemi B -osa mikroolekud võivad võrdse tõenäosusega kombineeruda D -osa kõigi mikroolekutega. Seetõttu $W_A = W_B \cdot W_D$, millest tuleneb, arvestades (2.1.2.3), nõue otsitavale funktsioonile f :

$$f(W_B \cdot W_D) = f(W_B) + f(W_D). \quad (2.1.2.4)$$



Joonis 2.4. Süsteem A nõrgalt interageerivatest osadest B ja D .

Teisendame nõude (2.1.2.4) diferentsiaalvõrrandiks. Leiame selle mõlemast pooldest 2. järku segatuletised:

| | |
|--|---|
| <p>Vasak pool</p> $\frac{\partial f}{\partial W_B} = \frac{df(W)}{dW} W_D,$ $\frac{\partial^2 f}{\partial W_B \partial W_D} =$ $= \frac{d^2 f(W)}{dW^2} W_D \cdot W_B + \frac{df(W)}{dW},$ | <p>Parem pool</p> $\frac{\partial f}{\partial W_B} = \frac{df(W_B)}{dW_B} W_B + 0,$ $\frac{\partial^2 f}{\partial W_B \partial W_D} = 0.$ |
|--|---|

Need on sama segatuletise avaldised, seega nende väärtused peavad võrduma. Arvestades ka $W_B W_D = W_A \equiv W$, peab kokkuvõttes kehtima võrdus

$$\frac{d^2 f(W)}{dW^2} \cdot W + \frac{df(W)}{dW} = 0. \quad (2.1.2.5)$$

Oleme teisendanud nõude, mida peab täitma funktsioon f , teist järku diferentsiaalvõrrandi vormi. Funktsiooni f kuju leidmiseks jääb vaid see võrrand lahendada.

Lahendamiseks teeme kõigepealt asenduse $g(W) = df(W)/dW$. Sellega saame võrrandi järku alandada. (2.1.2.5)-st saame siis

$$\frac{dg}{dW} \cdot W + g = 0 \quad \text{ehk} \quad \frac{dg}{g} = -\frac{dW}{W}. \quad (2.1.2.6)$$

Saadu on lihtne 1. järku võrrand. Selle lahendiks on $\ln g = -\ln W + C_0$ ehk $g = C_1/W$, kus $C_1 = e^{C_0}$. Kui sellesse lahendisse nüüd asendada tagasi $g = df/dW$, siis oleme funktsioonile f seatud nõudele samuti saanud lihtsa 1. järku võrrandi kuju:

$$\frac{df}{dW} = \frac{C_1}{W}. \quad (2.1.2.7)$$

Lõpuks, lahendanud võrrandi (2.1.2.7), saame otsitava sõltuvuse kuju:

$$f(W) = C_1 \cdot \ln W + C_1 \cdot C_2. \quad (2.1.2.8)$$

Konstandid C_1 ja C_2 valemis on integreerimiskonstandid, mille väärtused tuleb määrata seosele $S = f(W)$ seatavate *lisatingimuste* kohaselt. Lisatingimused võivad tuleneda funktsiooni nõutavast käitumisest mingites punktides, nõudmistest kooskõla kohta juba olemasolevate teadmistega jms.

Kõnealusel juhul näeme kõigepealt, et $C_1 = e^{C_0}$ tõttu on $C_1 > 0$. Et tagada $T = 0\text{K}$ juures termodünaamika III seaduse kohaselt ainsale olekule $W = 1$ vastavaks entroopia väärtuseks $S = 0$, tuleb nõuda $C_1 \cdot C_2 = 0$, mis koos juba C_1 kohta leituga annab $C_2 = 0$.

Seejärel määrab C_1 väärtuse nõue, et entroopia muutumine ideaalse gaasi juhul oleks kooskõlas selle kohta klassikalises termodünaamikas saadava tulemusega³. Sellise kooskõla tagab valik $C_1 = \frac{R}{N_A}$. Seega valemisse (2.1.2.2) kuuluv *Boltzmanni konstant* k_B avaldub *universaalse gaasikonstandi* R ja *Avogadro arvu* N_A suhtena (“gaasikonstandina ühe molekuli kohta”):

$$k_B \equiv C_1 = \frac{R}{N_A} \approx 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{J}}{\text{K}}. \quad (2.1.2.9)$$

Valemile (2.1.2.1) saab anda ka analoogi, milles makrooleku statistilise kaalu W asendab tõenäosus p : $S = k_B \cdot \ln W = k_B \cdot \ln (W/M \cdot M) = k_B \cdot \ln p + k_B \cdot \ln M$ ehk kokkuvõttes

$$S = k_B \cdot \ln p + k_B \cdot \ln M. \quad (2.1.2.10)$$

Tihti jäetakse Boltzmanni valemi esitamisel makrooleku tõenäosuse p kaudu selles teine liidetav ära, millega aga muudetakse valem kasutatavaks vaid entroopia muutuste arvutamise tarvis.

2.1.3 Gibbsi entroopiavalem

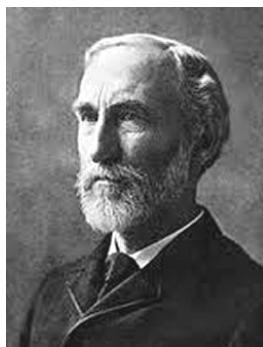
Boltzmann andis esmakordselt 1866. a entroopia statistikapõhise määratluse; ka ühitas ta süsteemi statistilise entroopia klassikalise termodünaamika vastava entroopiaga.

³ Klassikalises termodünaamikas saadakse 1 mooli (N_A molekuli) ideaalse gaasi isoteramilisel paisumisel V_1 -st V_2 -ni entroopia muutuseks $\Delta S = R \cdot \ln \frac{V_2}{V_1}$.

Boltzmanni valemi tuletamisel eeldati, et süsteemi kõik mikroolekud on võrdse tõenäosusega. Termodünaamikas on siiski tähtsal kohal mudelid, milles maailm jagatakse huviobjektiks olevaks süsteemiks ja keskkonnaks. Mikroolekud sellistes süsteemides ei ole võrdtõenäolised, näiteks püsitemperatuurse soojusreservuaariga kontakteeruv süsteem on suurema energiaga mikroolekud vähem tõenäolised kui väikese energiaga mikroolekud. Seetõttu jäi Boltzmanni valem praktiliste vajaduste jaoks ebapiisavaks.



Ludwig Boltzmann
1844–1906, Austria-Ungari



Josiah W. Gibbs
1839–1903, USA

Joonis 2.5. Statistilise termodünaamika alusepanijad.

Termodünaamiliste süsteemide kohta, milles mikroolekud ei pruugi olla võrdtõenäolised, leidis ameerika füüsika-, matemaatika- ja keemia-teoreetik Josiah Willard Gibbs (joonis 2.5) 1878. a üldistuse Boltzmanni valemile – *Gibbsi entroopiavalemi*, millega antakse entroopia statistikapõhine avaldis järgmiselt:

$$S = -k_B \cdot \sum_{i=1}^M p_i \ln p_i, \quad (2.1.3.1)$$

kus p_i on i -nda mikrooleku tõenäosus ja M on süsteemi mikroolekute koguarv.

Juhul kui süsteemi kõik mikroolekud on võrdtõenäolised, s.t kui kõik $p_i = 1/M$, annab (2.1.3.1) rakendamine mikroolekute süsteemile

tulemuseks

$$\begin{aligned} S|_{p_i=1/M} &= -k_B \cdot \sum_{i=1}^M \frac{1}{M} \ln \frac{1}{M} = -k_B \cdot \frac{M}{M} \ln \frac{1}{M} = \\ &= k_B \cdot \ln M. \end{aligned}$$

See ühtib Boltzmanni valemiga (2.1.2.1) saadavaga, sest vaadeldavas makroolekus, milleks on isoleeritud süsteemi tasakaaluolek ehk maksimaalse entroopiaga olek, peavad süsteemi mikroolekutest esinema kõik võimalikud, s.t vastav mikroolekute arv võrdub kõigi võimalike mikroolekute arvuga: $W = M$. Näeme, et rakendatuna Boltzmanni poolt käsitletud erijuhule, annab Gibbsi valem Boltzmanni valemiga sama tulemuse.

Selgitame Gibbsi valemi saamist.

Võib kujutleda, et süsteemi makroolek realiseerub kõigist võimalikest mikroolekutest nende kiire ajalise vaheldumisega, kusjuures mõned mikroolekutest ei esine selle makrooleku puhul üldse (esinevad tõenäosusega 0). Makrooleku karakteristikud tekivad selle realiseerumisel esinevatest mikrokarakteristikutest kui vastavate mikroolekute esinemissagedusega või -tõenäosusega kaalutud keskmised. Mikroolekute esinemistõenäosuse erinevused on võimalikud seetõttu, et üldjuhul saavad makroolekule vastavad mikroolekud omada erinevaid energiasid, s.t süsteemi energia võib fluktuueruda.⁴ Kinnises süsteemis (Boltzmanni juhtumile vastavas süsteemis ehk nn Gibbsi mikrokanoonilises mudelis) pole see energia jäävuse tõttu võimalik ning kõik tasakaalumikroolekud on võrdse energia ja võrdse tõenäosusega. Kuid Gibbs on esitanud veel kaks mudelit, milles vaadeldav süsteem vahetab energiat (nn kanooniline mudel) või energiat ja osakesi (nn suur kanooniline mudel) keskkonda modelleeriva termostaadiga – hiigelsuure konstantsel temperatuuril püsiva objektiga, mistõttu vaadeldava süsteemi

⁴ *Fluktuatsioonideks* nimetatakse statistilises süsteemis paratamatuid juhuslike muutujate väärtuste kõikumisi. Teatud olukordades on mõnede muutujate fluktuatsioonid võimatud, näiteks isoleeritud süsteemis ei saa energia selle jäävuse tõttu fluktuueruda. Elementaarne statistikateooria võimaldab väita, et fluktuatsioonide suhteline ulatus $\delta x = \Delta x / \bar{x}$ on pöördvõrdeline ruutjuurega süsteemi osakeste arvust $\delta x \sim 1/\sqrt{N}$.

energia saab fluktrueeruda ja tekib veidi erinevate energiatega mikroolekutest koosnevaid makroolekuid.

Gibbs kasutas süsteemi makrooleku modelleerimiseks mikroolekute *ansamblit*. Eeldades ergoodsust⁵, võib süsteemi makrooleku entroopia leidmiseks vajalikud statistilised karakteristikud saada nii süsteemi ajaloost, milles süsteem läbib mikroolekute rea, kui ka vaatlusaluse süsteemiga identsete, kuid juhuslikest mikroolekuist startinud mõttele süsteemide *statistilise ansambli* mikroolekute hetkepildist.

Statistiline ansambel sarnaneb ideaalse gaasiga. Mõlema “osakesed” – mõttelised süsteemid statistilises ansamblis ja molekulid ideaalses gaasis – on üksteisest sõltumatud ehk ei interageeri üksteisega. See võimaldab statistilisele ansamblile rakendada samasugust lähenemist nagu Boltzmann rakendas ideaalsele gaasile.

Niisiis, vaatleme kujuteldavat “ideaalset gaasi” (ansamblit), mis koosneb N -st vaadeldava süsteemiga identsest süsteemist, mingil aja hetkel. Arv N olgu küllalt suur, nii et ansambli “hetkepilt” esindaks süsteemi statistiliselt, s.t sisaldaks süsteemi koopiaid kõigis selle võimalikes mikroolekutes piisaval hulgal, nii et küllaldase täpsuse ja usaldusväärsusega oleks võimalik määrata ansambli statistilisi karakteristikuid. See tähendab, et N võiks olla vähemalt Avogadro arvu N_A suurusjärgus, ideaalina aga $N \rightarrow \infty$. Tähistame süsteemi *erinevate mikroolekute* koguarvu tähisega M , siis $M \ll N$. Süsteemi olekuruumi peame diskreetseks, koosnevaks *rakkudest*, milleks nüüd on üksteisest erinevad mikroolekud. Kõik rakud on “võrdse suurusega” ehk “võrdse tähtsusega”, iga (i -nda) raku statistilise kaalu ansamblis määrab selles paiknevate “molekulide” (vastavas mikroolekus olevate ansambli süsteemide) arv n_i .

Makrooleku kirjelduseks on nüüd vektor $\mathbf{n} = (n_1, n_2, \dots, n_M)$. See tähendab, et nüüd on \mathbf{n} -vektori tähenduseks mikroolekurakkude asusatus.

Siis Boltzmanni valemi 2.1.2.1 rakendamine annab N süsteemist

⁵ *Ergoodseteks* ehk *ergoodilisteks* nimetatakse selliseid süsteemis toimuvaid juhuslike protsesse, mille statistiliste karakteristikute väärtused, leituna protsessi ühel pikaajalisel realisatsioonil saadud väärtuste põhjal ja leituna hulga juhuslikest lähtepunktidest paralleelselt toimuvate realisatsioonide hetkväärtuste ansambli põhjal, on ühesugused.

koosneva ansambli makrooleku $\mathbf{n} = (n_1, n_2, \dots, n_M)$ entroopiaks

$$\begin{aligned}
 S_N(\mathbf{n}) &= k_B \cdot \ln W_{\mathbf{n}} = k_B \cdot \ln \frac{N!}{n_1! \cdot n_2! \cdot \dots \cdot n_M!} = \\
 &= k_B \cdot \left(\ln N! - \sum_{i=1}^M \ln n_i! \right) \approx \\
 &\approx k_B \cdot \left(N \ln N - N - \sum_{i=1}^M (n_i \ln n_i - n_i) \right) = \\
 &= -k_B \cdot \left(\sum_{i=1}^M n_i \ln n_i - N \ln N \right) = \\
 &= -k_B \cdot \sum_{i=1}^M n_i \ln \frac{n_i}{N} = -k_B N \cdot \sum_{i=1}^M \frac{n_i}{N} \ln \frac{n_i}{N}.
 \end{aligned}$$

Kui siin $N \rightarrow \infty$, siis n_i/N annab i -nda mikrooleku esinemistõenäosuse p_i antud makrooleku korral. Makroolekule \mathbf{n} vastavasse ansamblisse kuuluva ühe süsteemi entroopiaks saame seega

$$S(\mathbf{n}) = -k_B \cdot \sum_{i=1}^M p_i \ln p_i,$$

mis esitab entroopia avaldise süsteemile kõikvõimalike mikroolekute i ($i = 1, 2, \dots, M$) arvuga M , sellises makroolekus, kus mikroolekud esinevad tõenäosustega p_i .

Olemegi saanud Gibbsi entroopiavalemi.

Mõlemad entroopiavalemid, nii Boltzmanni kui ka Gibbsi oma, kuuluvad tänapäeva statistilise termodünaamika ja üldiselt füüsika tugisammaste hulka. Nad võimaldavad rakendada klassikalises termodünaamikas algselt vaid tasakaaluoleku jaoks defineeritud entroopia mõistet laiemalt, ka mittetasakaaluolekuile.

Siiski on Gibbsi valem üldisem, kehtides ka mitteisoleeritud süsteemide kohta. Entroopia definitsioonid, mis erinevad Gibbsi poolt antust – neid on samuti esitatud ja kasutatakse – eeldavad süsteemi tasakaalulisust, isoleeritust või mingite muude tingimuste täidetust süsteemi ja keskkonna interaktsiooni poolt.

Valemit (2.1.3.1) rakendatakse laialt paljudes teadustes. Matemaatilises statistikas annab see valem (ilma tegurita k_B) diskreetse juhusliku suuruse tõenäosustiheduse jaotuse entroopia. See on suurus, mis mõõdab jaotuse ühtlust: suurema entroopiaga jaotused on lähemal ühtlasele jaotusele. Andmeside ja -töötluse valdkonnas mõõdetakse Gibbsi valemiga väga sarnase Shannoni valemi abil (vt tabelit 4.3 lk 88) andmehulkade mahtu. Bioloogias põhinevad valemil (2.1.3.1) organismide keerukuse (vt valemit 5.1.3.2 lk 115) ja bioloogilise mitmekesisuse mõõdud; sotsioloogias sotsiaalse võrdsuse mõõt; poliitikas kasutatakse seda valimiskäitumise hindamisel; majandusteaduses turgude toimimise hindamisel; meditsiinis (anestesioloogias) narkoosi sügavuse EEG-põhisel hindamisel jm.

Teooria vaatekohalt võib tõdeda, et Boltzmanni ja Gibbsi valemitega saavutatav kooskõla teoreetilise (statistilise) termodünaamika entroopia ja fenomenoloogilise (klassikalise) termodünaamika entroopia vahel väljendab tõsiasja, et matemaatilis-teoreetiline tõenäosus realseerub ka materiaalse maailma tegelikkuses.

2.2 Entroopiaseaduse järeldused

2.2.1 Järeldused entroopia kasvamisest

Nüüsiis, oleme näinud, vt (1.3.3.8), et kui isoleeritud klassikalise termodünaamilise süsteemi olek saab ajas muutuda (s.t kui see juba ei ole tasakaaluolek), siis muutumine toimub nii ja ainult nii, et süsteemi entroopia kasvab. Boltzmanni valemist (2.1.2.10) näeme, et entroopia kasvamine isoleeritud süsteemis on samaväärne selle süsteemi siirdumisega (evolutsiooniga, arenemisega) oma tõenäolisemate olekute poole. Võime sõnastada *termodünaamika II seaduse* ka selliselt:

Kui isoleeritud süsteem ei ole tasakaaluolekus, siis saab see vaid evolutsioneeruda oma tõenäolisema oleku – tasakaaluoleku – poole.

See on lihtne ja ka igapäevase kogemusega kooskõlas olev sõnastus, millest selgub ilmekalt termodünaamika II seaduse sisu – **entroopia**

kasvamine pole mitte midagi muud kui siirdumine üha tõenäolisematesse olekutesse.

Niivõrd, kui võrd mingit reaalselt objekti võib pidada isoleerituks, kehtib see väide ka mitmesuguste reaalselt objektide kohta. Seega, mida nõrgemad on universumi mingi osa seosed oma ümbrusega, seda enam võiks väide maailma sellise osa kohta paika pidada. Niisuguste küllalt isoleeritud piirkondadena võiks inimkonna seisukohalt oluliseks pidada meie Galaktikat, Päikesesüsteemi, planeeti Maa, piirkondi Maal jne kuni iga üksiku inimese koduni. Iseloomulik ajaintervall, mille kestel võiks neid piirkondi lähendada isoleerituga, varieeruks siis vastavalt Galaktika vanuse mingist väikesest murdosast kuni mõne ööpäeva või minutini.

Entroopia kasvamist süsteemis nimetatakse tihti ka selle süsteemi energia kvaliteedi languseks ehk süsteemi energia degradeerumiseks. Päril korrektna see väljend pole, sest entroopia ei ole energia omadus, vaid on ikkagi *süsteemi* oleku karakteristik (üks olekufunktsioonidest), nagu energiagi.

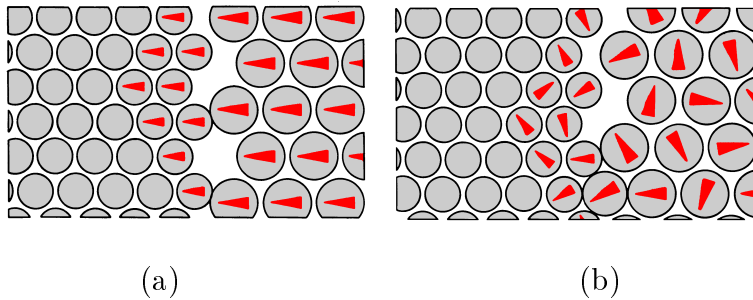
Sellise väljendi kasutamist ajendab näiteks asjaolu, et mida lähemal on isoleeritud süsteemi entroopia oma maksimumväärtusele, seda tasakaalulähisem see süsteem on; seda väiksema osa oma siseenergiast saab see muundada (*sobiva organiseerituse korral*, nt kui süsteem sisaldab töövoimelist soojusmasinat) korrastatud mehaaniliseks tööks. Helmholtzi vabaenergia avaldisest (1.3.3.9) näeme, et süsteemi entroopia S kasvamisel selle vabaenergia F – mis on konstantsete temperatuuri ja ruumala juures maksimaalselt võimalik süsteemi poolt siseenergia arvel tehtav töö – kahaneb.

Siin on kohane refereerida briti füsikokeemiku ja teaduse popularisaatori Peter W. Atkinsi poolt raamatus [2] esitatud selgitusi.

Termodünaamilise süsteemi siseenergia võrdub selle koostisosade kineetiliste ja potentsiaalsete energiatega summaga. Paljust osakestest koosnevais süsteemides leiab aset liikumise vorm, mis üksikul osakesel puudub.

Kui suure osakeste hulga kõik osakesed liiguvad samas suunas ja võrdsete kiirustega, siis liigub kogu süsteem makroskoopiliselt kulgelt ning see käitub analoogiliselt üheainsa massiivse osakesega.

On olemas aga ka teistsugune liikumisviis, mille puhul osakesed liiguvad mitte ühetaoliselt vaid *kaootiliselt*. Süsteemi osakeste kineetilis-

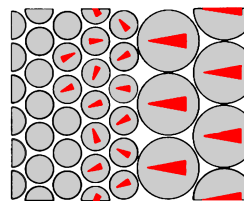


Joonis 2.6. P. Atkinsi [2] illustratsioon energia ülekande võimaluste kohta:
(a) – energia ülekanne töö kujul, (b) – soojusülekanne.

te energiatega summa võib seejuures olla sama suur nagu eelmisel juhul, kuid nüüd puudub osakeste liikumiste vahel korrelatsioon. Sellist *juhuslikku, kaootilist, korreleerimata, mittekoherentset, korrapäratut* liikumist nimetatakse *soojusliikumiseks*.

Kehale energia ülekandmiseks on olemas kaks võimalust – energia ülekanne töö kujul ja soojusülekanne. Kehale mehaanilise töö rakendamise sunnitakse selle osakesi liikuma ühetaoliselt mingi makroskoopilise korra kohaselt, keha soojendamisel aga kandub sellele üle kaootiline soojusliikumine (vt joonist 2.6).

Reaalsetes mittepööratavates protsessides, näiteks mitteelastsel põrkel, hõõrdumisega liikumisel, vedeliku viskoossel voolamisel, elektrivoolu voolamisel läbi takistust omava juhi jm, toimub *energia dissipatsioon* (lad k *dissipare* – hajutama) – potentsiaalse energia või suunatud liikumise energia muutumine kaootilise soojusliikumise kiineetiliseks energiaks. Atkinsi esitatud piltlikku demonstratsiooni energia dissipatsiooni kohta põrkel vt jooniselt 2.7.



Joonis 2.7. P. Atkinsi [2] illustratsioon energia dissipatsiooni kohta põrkel. Mikrotasemel toimub osa põrkeid osakeste vahel mittetsentraalsetena. Seetõttu osa suunatud liikumisest *degradeerub*.

Entroopiat nimetatakse väga tihti ka *korrapäratuse mõõduks*. Seda väidet tu-

leb pidada populaarseks selgituseks; seda ei saa pidada täpseks, sest siin seletatakse täpselt mõistet *entroopia* täpselt defineerimata sõna *korrapäratus* abil. Korrapäratus on *subjektiivne kontekstist sõltuv hinnang* süsteemi olekule.

2.2.2 “Entroopiavõidujooks”

Praktikas tuleb nähtavasti tunnistada, et entroopia kasvamine on maailmas toimuv fundamentaalne ja paratamatu protsess, mida ei saa vältida ja millest hoidumine (nt teostades vajalikke protsesse tasakaaluliselt) näib tähendavat ühtlasi hoidumist ka muutustest, sealhulgas eluliselt vajalikest muutustest. Siit tulenevad inimkonna jaoks ülesanded õppida tundma oma vajadusi ja võimalusi (ning viimaseid ka kasvatada), et osata formuleerida ja lahendada kompleksne optimumiülesanne kahe peamise eesmärgi – minimeerida entroopia kasv, samas tagades kohastumise ja arengu – ning hulga väikesema tähtsusega eesmärkide katkematuks koossaavutamiseks.

1943. a pidas kvantmehaanika üks rajajaid Erwin Schrödinger (joonis 2.8) Iirimaa Dublinis eluga seotud küsimuste kohta loengud, millest järgmisel aastal ilmus paljusid mõjutanud raamat “What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell” (*Mis on elu? Elusrakk füüsika vaatekohalt*) [25], [26].⁶

Palju muu olulise kõrval on ta seal öelnud kuulsalt lause: “**Organism toitub negatiivse märgiga entroopiast.**”

Schrödinger selgitab, et kui entroopia on korratuse (*disorder*) mõõt, siis negatiivselt märgistatud entroopia peab olema korra (*order*)⁷ mõõt. Terminid *aine- ja energiahetus* rakendamise organismi kohta on Schrödingeri hinnangul



Erwin Schrödinger
1887–1961, Austria

Joonis 2.8.

⁶ Vt. ka http://whatislife.stanford.edu/LoCo_files/What-is-Life.pdf

⁷ Õigem oleks nimetada seda organiseerituseks. Vt ka lk 105. *Märkus konspekti autoreilt.*

sisult väär – aine ja energia hulk on täiskasvanu organismis statsionaarsed ja nende lihtne *vahetamine* ei annaks midagi. Iga protsess, mis meis toimub, tähendab meis entroopia tekkimist. Nii tekitab iga elusorganism pidevalt eneses entroopiat ehk toodab positiivset entroopiat, mille kuhjumine võiks viia tema surmani. Ta suudab seda vältida, “ammutades pidevalt oma keskkonnast negatiivset entroopiat” (*by continually drawing from its environment negative entropy*). “Millest organism toitub, see on negatiivne entroopia. Ehk, vähem paradoksaalselt väljendudes, peamine asi metabolismis on, et organism saab hakkama enese vabastamisega kogu entroopiast, mida ta ei saa – kuni on elus – jätta tootmata.”

Schrödinger on esimene, kes on võtnud kasutusele sõnaühendi “negatiivne entroopia”. Prantsuse füüsik Léon Brillouin rakendas seda terminina ja lühendas kujule *negentroopia* (vt lk 88).

Rangelt võttes ei ole Schrödinger siin olnud korrektne. Organism ei saa toituda negatiivsest entroopiast – negatiivset entroopiat ei ole “toidu” kujul kusagil olemas. Siin on tegemist piltliku väljendusega. *Negatiivne saab olla entroopia bilanss organismi funktsioneerimisel* või selle mõni liidetav. Organism kasutab oma materiaalses elutegevuses füüsikalist tööd, mille abil ta teostab oma funktsioneerimist ja ümbruse kujundamist. Võib öelda, et mehaanilise töö produtseerib nt loomorganism nagu soojusmasingi entroopiavabal kujul, “makstes” selle eest osaga välisest allikast saadud “kütuse põletamisel” vabanevast energiast, mille ta soojusena keskkonda ära annab. Organism töötab sarnaselt soojusmasinaga. Schrödinger juhib aga tähelepanu entroopia nullilähedase bilansi vajalikkusele organismis.

Niisiis, elussüsteemid kasutavad oma elusoleku kindlustamise ühe abinõuna keskkonna korrastamist ehk organiseerimist oma ümbruses. See toimub ümbruse muutmise abil ja sellise muutmise vahendiks on füüsikaline töö, mida elussüsteemid (nii ainuraksed kui ka hulkraksed; taimed, loomad jm) rakendavad keskkonnale. Töö tulemusena keskkond muutub, sealjuures osa muutustest võib olla selline, mis nõuab ka elussüsteemide eneste kohastumuslikku muutumist. Igal juhul kaasneb igasuguste reaalseste materiaalsete protsessidega entroopia kasvamine, mis häirib elussüsteemide elutegevust ja võib põhjustada ka neist üksikute hukkumise, liikide väljasuremise või koguni suure osa elustiku hävimise.

Seetõttu on elussüsteemid, sealhulgas ka inimkond, osalised pidevas “*entroopiavõidujooksus*”, mille käigus nad peavad suutma kohastuda muutuva keskkonnaga, kusjuures nad võivad oma elutegevusega olla ise selle keskkonna väga olulised muutjad (vt joonist 2.9).



Töötlus Günther Reindorffi joonistusest, vt lk 158.

Joonis 2.9. “Entroopiavõidujooks”: Inimkond jookseb sillal, mis variseb tema selja taga. Just jookseb tugevdab suuresti varisemist.

Kuna isolatsioon toob kaasa süsteemi entroopia maksimeerumise, siis on isolatsiooni sattumine tugev mõjur “entroopiavõidujooksus” alajäämiseks. Näiteks selle kohta on veini käärimisprotsess käärimisnõus. Küllaltki kinnises süsteemis toimuvad käärimisprotsessid tekitavad produkti – piirituse – milles lõpuks hukuvad seda protsessi käivitanud ja ülal hoidnud elusorganismid – pärmseened.

Üheks elussüsteemide taktikaks “entroopiavõidujooksus” on isolatsiooni vältimine: kui on olemas vaba ruumi, siis saab aina hõlvata uusi madala entroopiaga alasid. Sellist taktikat on inimkond rakendanud nomaadluse aegadel. Praeguseks on suurem osa inimkonnast sellelt ekstensiivselt taktikalt siirdunud intensiivsetele taktikatele, sest inimeste arvukuse kasvades on ilmnunud maaressursi piiratus.

Elussüsteemide teiseks taktikaks on olnud “uute, seni kasutamata tehnoloogiate” kasutuselevõtt. See on intensiivne taktika, mille näiteks on algse *anaeroobse elu* vahetumine Maal fotosünteesil põhinevaga (J. Baez, [4]⁸). Maal puudus esialgu vaba hapnik ja esimesed elussüsteemid (3,65 miljardit aastat tagasi või varem) siin olid anaeroobsed. Nende elutegevus põhjustas atmosfääri metaani kogunemise. Mingist hetkest (oletatavalt 3,5 kuni 2,6 miljardit aastat tagasi) alates leidsid mõned mikroobid “uue, seni kasutamata energeetilise tehnoloogia” fotosünteesi näol ning hakkasid selle käigus atmosfääri väljutama hapnikku. See oli senisele elule surmavalt mürgine gaas. Umbes 2,5 miljardit aastat tagasi oli selle tulemuseks nn *hapnikukatastroof*. Suurem osa esimestest elusorganismidest ei elanud seda üle. Ülekaalukas osa nüüdsest elust aga põhineb just aeroobsetel (hapnikku kasutavatel) reaktsioonidel.

Näib, et elussüsteemide konkurentsiresursside pärast muutuv maailmas on eelised olnud neil, kes suudavad tegutseda kiiremini ja mittetasakaalulisemalt, mis aga aina soodustab maailma entroopia kasvamist. Inimkonna kui väga teovõimsa elussüsteemi senine evolutsioon on loonud tingimused, milles inimkonnal on võime otsustavalt mõjutada kogu Maa elustiku edasist käekäiku. Sellise võime olemasolu nõuab inimkonnalt ka vastutust nii enese kui ka kogu Maa elustiku eest. Selle strateegilise ülesande jaoks on kasutada nii eespool kirjeldatud varem kasutatud taktikad kui ka tuleb välja töötada uusi. Teadvuse olemasolu ja ettenägemisvõime arenemine saab olla abinõuks, millega inimkond peab suutma juhtida kogu elu Maal nii, et see “entroopiavõidujooksus rajale jääks”.

⁸ Vt internetiaadressilt

<http://physicsworld.com/cws/article/print/2009/jul/31/the-earth-for-physicists>

Peatükk 3

Termodünaamika hilisemad arengud

3.1 Mittetasakaaluline termodünaamika

Termodünaamika areng XX sajandil on suurendanud selle teadusharu võimekust elussüsteemide vallas. Sajandi esimesel poolel asuti statistilise termodünaamika lähenemisviisi rakendama ka mittetasakaaluliste süsteemide uurimisel. Esmalt saavutati edu nõrgalt mittetasakaaluliste süsteemide juhul.

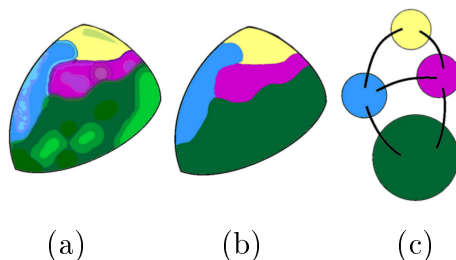
Seejärel asuti uurima ka tugevalt mittetasakaalulisi süsteeme. Selle valdkonna kohta on kasutusel erinevaid nimetusi, nagu *mittetasakaaluline termodünaamika*, *pöördumatute protsesside termodünaamika*, *dissipatiivsete süsteemide termodünaamika*, *sünergeetika* (kr k $\sigma\nu\nu\varepsilon\rho\gamma\iota\alpha$ – koostöö, abi).

Teooria käsitleb termodünaamilist süsteemi eksisteerivana füüsilises ruumis ja muutuvana ajas. Alates siit on kõnealuses valdkonnas tegemist ajaliste protsesside uurimisega. Süsteemi ruumilist eksistentsi võidakse arvestada:

- 1) lihtsamal viisil – ilma ruumi meetrikat kasutamata – (palju)kambriliste mudelite abil;
- 2) või detailselt – ruumi meetrika kasutamisega – lauskeskkonna-mudelitena (vt joonis 3.1).

Teooria matemaatiliseks vormiks on vastavalt:

- 1) koondatud parameetritega süsteemide teooriale (nt elektriahelad) iseloomulikud harilikud diferentsiaalvõrrandid ja/või harilikud (nn algebralised) võrrandid;
- 2) lauskeskkonna teooriale (nt hüdrodünaamika) iseloomulikud osatuletistega diferentsiaalvõrrandid või nende lähendused lineaarvõrrandi-süsteemidega.



Joonis 3.1. Süsteemi ruumilise struktuuri arvestamine mudelis:

- (a) – algteadmised süsteemist, (b) – tükiti-homogeenne lauskeskkonna-mudel, (c) – kambermudel.

3.2 Nõrgalt mittetasakaaluliste süsteemide termodünaamika

Seda suunda termodünaamikas asuti arendama 1920. aastatel. Matemaatilise vormi põhjal nimetatakse seda ka *lineaarseks mittetasakaaluliseks termodünaamikaks*. Lineaarne teooria seletab, et mittetasakaaluline süsteem saab pidevalt toota entroopiat ja olla seejuures püsiv. Tasakaalulähine süsteem evolutsioneerub seejuures statsionaar-sesse olekusse, mille juures entroopia tootmise kiirus saab minimaalseks.

Termodünaamilise tasakaalu seisundist vähe eemal olevate süsteemide käsitlemisel on võimalik teha mitmesuguseid lihtsustusi, mis

tagavad nende matemaatilise kirjelduse lineaarsuse.¹

Lihtsustustest olulisim on lokaalse tasakaalu eeldus. Selle kohaselt lähendatakse üldise makroskoopilise nõrga mittetasakaalulisuse foonil iga ruumipunkti ümbrus igal hetkel tasakaalulise olekuga. Reaalsusega sobib selline lähend siis ja sellistes süsteemides, kus lokaalne tasakaal saabub kiiremini kui tasakaal süsteemi kaugete osade vahel. Nõrga interaktsiooni korral süsteemi osade vahel ongi see tavaline. Sel juhul kehtivad lokaalsete väärtuste jaoks igas punktis tasakaalulisest termodünaamikast tuntud valemid. Lokaalset seisundit kirjeldab täiesti klassikalist tüüpi tasakaalu-olekuvõrrand², mis ei sisalda olekumuutujate gradiente:

$$T \cdot ds = du + P \cdot dv - \sum_i \mu_i \cdot dc_i, \quad (3.2.0.1)$$

kus suurused s, u, v, c_i on vastavalt S, U, V, C_i väärtused massiühiku kohta. Kuid seejuures eksisteerivad süsteemis osadevahelised vood (voolamised).

Mittetasakaalulises termodünaamikas vajatakse rohkem mõisteid ja kontseptsioone kui tasakaalulises. Klassikalisel termodünaamikas ei vajata nt süsteemi koostisosade ajalisi karakteristikuid, mittetasakaalulises termodünaamikas on neid vaja. Probleemiks on ka entroopia mõiste üldistamine mittetasakaaluliste süsteemide juhule. Nõrgalt mittetasakaaluliste avatud süsteemide termodünaamikas arvestatakse entroopia tekkimise protsessi, mida vaadeldakse ajalise protsessina (siin on selle teadusharu erinevused ühelt poolt klassikalisest termodünaamikast ja teiselt poolt lauskeskkonna mehaanikast). Kui klassikalise termodünaamika põhjal saime *maailma* entroopia kohta temas reaalse protsessi toimumise korral vaid hinnangu $dS > 0$ (1.3.3.7), siis

¹ *Lineaar*seks nimetatakse süsteemiteoorias süsteemi (vt Wikipediast http://en.wikipedia.org/wiki/Linear_system) [38], milles suvalise mõjutuse x seost süsteemi vastava reaktsiooniga y kirjeldab *lineaarne operaator* H : $y = H\{x\}$. Operaatorit H nimetatakse lineaarseks siis, kui ta rahuldab *lineaarsuse tingimusi*: $H\{x_1 + x_2\} = H\{x_1\} + H\{x_2\}$ ja $H\{k \cdot x\} = k \cdot H\{x\}$ (kus k on arvkonstant).

² *Klassikalise termodünaamika põhivõrrand* on kujul $T \cdot dS = dU + P \cdot dV - \sum_i \mu_i \cdot dC_i$, milles μ_i ja C_i on süsteemi ainete keemilised potentsiaalid ja molaarkontsentratsioonid.

kõnealusel teoorias asutakse pidama entroopia bilanssi süsteemis:

$$dS = d_I S + d_E S. \quad (3.2.0.2)$$

Siin indeks I märgistab süsteemi sisemuses (interjööri) tekkiva entroopia juurdekasvu ja E süsteemi väljastpoolt (eksterjööri) saabuva entroopia juurdekasvu süsteemis (vt joonist 3.2).

Et isoleeritud süsteemi juhul peab muidugi kehtima $dS = d_I S \geq 0$, siis *postuleeritakse* siin, et igasuguses süsteemis alati $d_I S \geq 0$, kuid seejuures võib $d_E S$ olla nii positiivne kui ka negatiivne või 0.

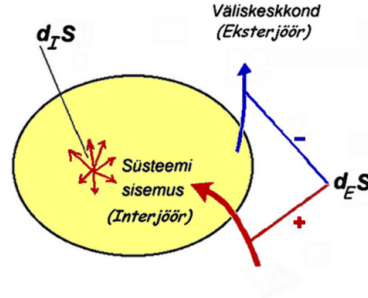
Defineeritakse uus mõiste: *entroopia tekkimise kiiruse ruumtihedus*:

$$\sigma_S \stackrel{\text{def}}{=} \frac{\partial_I^2 S}{\partial t \partial V}, \quad \bar{\sigma}_S \stackrel{\text{def}}{=} \frac{1}{V} \cdot \frac{d_I S}{dt}. \quad (3.2.0.3)$$

Suurust σ_S kasutatakse pideva keskkonna puhul, ruumalakeskmist väärtust $\bar{\sigma}_S$ – kambermodelites.

Vaatleme selle teooria võrrandeid lihtsal juhul, kui süsteemi modelleeritakse kambermodeliga. Süsteemi osade vahelisi seoseid kirjeldavateks muutujateks on sel juhul üldistatud vood ja üldistatud liikumapanevad jõud. Voogude näiteks võib tuua vedeliku mahtkiiruse, elektrivoolu, aine hulga muutuse keemilises reaktsioonis. Vastavaiks voo põhjustajaks – liikumapanevateks jõududeks – on neil juhtudel rõhkude vahe, elektripotentsiaalide vahe, keemiliste potentsiaalide vahe. Süsteemi matemaatiline kirjeldus on analoogiline lineaarse elektriiahela kirjeldusega. Kirjelduse võib esitada süsteemi kõigi kambrite vaheliste ühenduste kirjeldusena. Iga võrrand selles kirjelduses on lineaarne ja esitab vastava voo J_i seoseid liikumapanevate jõududega X_j :

$$J_i = \sum_{j=1}^n L_{ij} X_j, \quad (i = 1, \dots, n). \quad (3.2.0.4)$$



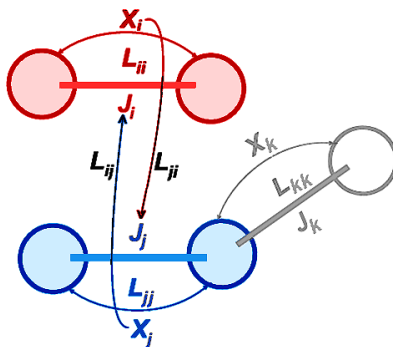
Joonis 3.2. Entroopia bilansi arvestamine avatud mittetasakaalulises süsteemis.

Iga koefitsient L_{ii} neis võrrandeis on i -nda kambritevahelise kanali üldistatud juhtivus (süsteemi parameeter), iga L_{ij} on parameeter, mis kirjeldab j -ndas kanalis toimiva üldistatud jõu (või protsessi) mõju mingi teise, i -nda kanali voole (või protsessile).

Muide, süsteemis ajaühiku jooksul soojuseks muutuv energia avaldub võimsuse arvutamise tuntud avaldistega (meenutage nt Joule'i-Lenzi seadust!):

$$N_i \equiv \frac{d_I Q_i}{dt} = X_i \cdot J_i, \quad N = \sum_i N_i \quad (3.2.0.5)$$

Siin N_i on süsteemi dissipatsioonivõimsus (hajusoojuse tekkekiirus) selles i -nda voo olemasolu tõttu, N aga süsteemi kogu hajuvõimsus.



Joonis 3.3. Onsageri teoreem: protsesside vastastikune mõju.

Näiteks võiksid siin üldistatud jõud X ja vood J olla järgmised:

- X_i – CO_3^{2-} kontsentratsioonivahe organismi kudede ja kapillaarvere vahel,
- X_j – O_2 kontsentratsioonivahe kapillaarvere ja organismi kudede vahel,
- J_i – CO_3^{2-} liikumine kudedest kapillaarverre,
- J_j – O_2 liikumine kapillaarverest kudedesse.

Siis peavad vastasmõjude koefitsiendid L_{ij} ja L_{ji} olema võrdsed.

1931. a tõestas norra päritolu hilisem Nobeli preemia laureaat Lars Onsager (joonis 3.4) statistilise füüsika meetodeid kasutades, et niisugustes termodünaamilistes süsteemides kehtib

$$L_{ij} = L_{ji}. \quad (3.2.0.6)$$

Võrdus (3.2.0.6) – *Onsageri teoreem* – tähendab, et kui nõrgalt mittetasakaalulises süsteemis toimuvatest protsessidest üks mõjutab

teist, siis omakorda teine mõjutab ka esimest ja nende mõjude vastavad toimetegurid L_{ij} ja L_{ji} on teineteisega võrdsed (vt joonist 3.3). Pangem siin tähele sarnasust Newtoni III seadusega!

Onsageri seosed (3.2.0.6) on nõrgalt mittetasakaalulise termodünaamika teooria tänaste praktiliste rakenduste peamine instrument.

Entroopiaseaduse tähendus esitatakse selles teoorias nii [29] :

Termodünaamika II seaduse sisuks on väide, et mistahes mittetasakaaluliste protsessidega kaasneb hajusoojuse (dissipeeruva soojuse) teke.

Nõrgalt mittetasakaaluliste süsteemide termodünaamika oluliseks tulemuseks on 1977. a Nobeli preemia pälvinud vene päritolu belgia teadlase Ilya Prigogine'i (joonis 3.4) 1945. a esitatud *Prigogine'i teoreem*, mis väidab:

Statsionaarselt realiseeritav protsess toodab entroopiat konstantse kiirusega ja minimaalselt, võrreldes kõigi teiste samade välistingimuste juures kulgevate protsessidega.

Lähemalt saab sellega tutvuda P. Glansdorffi ja I. Prigogine'i raamatus [8] (vene k [9]) ja ka internetis kättesaadavais õpikuis.³

Niisiis on Prigogine jt esitanud teoreetilise kinnituse võimalikule seisukohale, mida puudutasime eespool lk 57 seoses inimkonna taktikaga “entroopiavõidujooksus”: kõige vähem reostaksime me oma keskkonda siis, kui seaksime sisse statsionaarse elu. Seda teed me nähtavasti ei taha ega saa siiski minna, sest selline olukord kannab ka nime ”stagnatsioon”.

Teoreem ise ei ole triviaalne. Selle teoreemi üle on toimunud ka tõsisemaid teoreetilisi vaidlusi, vt [12], [10].

Entroopia tootmise kiirus osutub eelöeldu kontekstis mittetasakaalulise süsteemi evolutsiooni oluliseks indikaatoriks.

³ Näiteks A. Rubini mahukas venekeelne õpik [23],
vt <http://library.biophys.msu.ru/rubin/>



Lars Onsager
1903 Norra–1976 USA



Ilya Prigogine
1917 Venemaa–2003 Belgia

Joonis 3.4. Mittetasakaalulise termodünaamika teoreetikuid.

On püstitatud ülesanne avatud mittetasakaalulise süsteemi seisundi muutumise prognoosimise kohta selle näitaja põhjal [29]. Entroopia tootmise kiiruse hindamiseks kasutatakse süsteemi hajusoojust. Arvestades (3.2.0.5), saame entroopia tekke kiiruse keskmisele ruumtihedusele süsteemis avaldise

$$\bar{\sigma}_S = \frac{1}{V} \cdot \sum_i \frac{d_I S_i}{dt} = \frac{1}{V} \cdot \sum_i \frac{d_I Q_i}{T \cdot dt} = \frac{N}{VT}. \quad (3.2.0.7)$$

Siit näeme entroopia tekkekiirusega seotud mõõdetavatest karakteristikutest enim kasutatava näitaja – *dissipatsioonifunktsiooni* – tähenduse ja seose entroopia tekkekiirusega; see on sisult dissipatsioonivõimsuse keskmine ruumtihedus ja erineb entroopia tekkekiirusest temperatuuri kordselt:

$$\psi \stackrel{def}{=} \frac{N}{V} = T \cdot \bar{\sigma}_S. \quad (3.2.0.8)$$

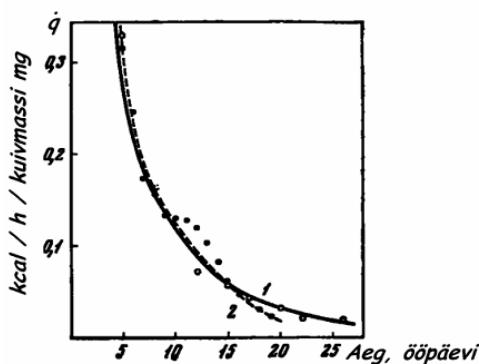
Prigogine jt on esitanud ka *nõrgalt mittetasakaaluliste avatud süsteemide evolutsioonikriteeriumi*. Evolutsiooniks nimetab Prigogine suunda omavat muutumist ajas, evolutsioonikriteerium on matemaatiline reegel, mille põhjal võib otsustada süsteemi evolutsiooni suuna ja kiiruse üle:

Nõrgalt mittetasakaaluliste avatud süsteemide evolutsioon toimub dissipatsiooni vähenemise suunas kuni stationaarse oleku saavutamiseni:

$$\frac{d\psi}{dt} \leq 0. \quad (3.2.0.9)$$

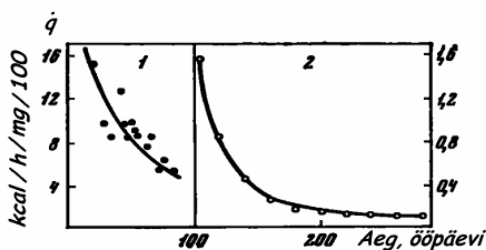
Stationaarses olekus dissipatsioon enam ei muutu, $\frac{d\psi}{dt} = 0$, kuid $\psi > 0$ jääb *minimaalsena* alles. Näeme nõrgalt mittetasakaalulise avatud süsteemi erinevust isoleeritud süsteemist, mille entroopia evolutsiooni lõppstaadiumis saab maksimaalseks ja muutumatuks.

Bioloogiateaduses on tehtud rohkesti uuringuid siin refereeritud teooria tulemuste kontrollimiseks ja rakendamiseks. Nende seast ühe, A. Zotini jt publikatsiooni [29], lk. 43-65, tulemusi esitab joonis (3.5).



Hajusoojuse tekkekiirus kanaembrüotel (Zotina, 1966) ja pardiembrüotel (Haskin, 1961) vastavalt haude kestusele.

1- pardid, 2- kanad.



Hajusoojuse tekkekiirus forellimaimude arengu käigus (Zotina, 1966) ja hingamise intensiivsus veiste embrüonaalse arengu käigus (Nagornõi jt., 1963).

1- forellimaimud, 2- veised

Joonis 3.5. A.I. Zotin jt, 1976 [29]: Organismide individuaalne arenemine allub Prigogine'i nõrgalt mittetasakaaluliste avatud süsteemide evolutsioonikriteeriumi taolisele printsiibile.

3.3 Tugevalt mittetasakaaluliste nähtuste termodünaamika

3.3.1 Mittelineaarsuse avaldumine tasakaalust hälbivates nähtustes

Tugevasti tasakaaluolekust eemal olevates süsteemides toimuvad nähtused on mittelineaarse iseloomuga. Mittelineaarsete nähtuste hulk on lineaarsete nähtuste hulgast väga palju mitmekesisem. Sellest tuleneb, et mittetasakaalulise termodünaamika uurida on nähtuste suur mitmekesisus. Peale selle on mittelineaarsete nähtuste uurimine tehniliselt raskem kui lineaarsete nähtuste uurimine. Kõik see põhjustab ühelt poolt suuri lootusi leida tugevalt mittetasakaalulise termodünaamika kaudu vastuseid seni vastamata küsimustele ja teiselt poolt teeb selle töö raskeks.

Süsteemiteoorias [33]⁴, [41]⁵, mis tegeleb probleemidega uue termodünaamika huvivaldkonna lähedal, on üks oluline küsimus olnud *püsivus* ehk *stabiilsus* [35]⁶:

Püsivaks nimetatakse protsessi, mis ei kaldu häiringu toimel oluliselt kõrvale oma kulust ja pöördub selle juurde tagasi häiringu möödumise järel.

Klassikalise termodünaamika süsteemid (s.t mudelid) on alati pööratavad, neis on tagatud tagasipöördumise võimalus, kuid nad on tagasipöördumise suhtes “ükskõiksed”. Süsteemide teooria lineaarsete süsteemidega tegelevas osas ei kuulu mittepüsivad olekud vaatlemisele – need viiksid süsteemi oma algolekust tunduvalt eemale. Mõni olekumuutuja kasvaks piiramatult, kui süsteem jääks selles protsessis lineaarseks. Tegelikuses hakkavad suurte hälvete korral avalduma seni nõrga mõjuga olnud mittelineaarsused – süsteem osutub mittelineaarseks.

Praktikas ja teooria arendamisel on selgunud, et mittelineaarses süsteemis võib püsivuse kadu mittelineaarse piirangu tõttu viia süsteem-

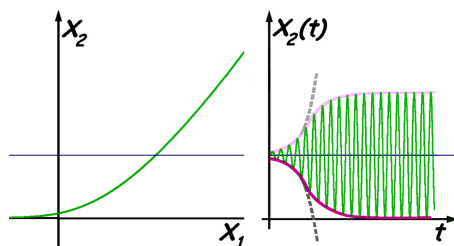
⁴ Vt. Wikibooks

http://en.wikibooks.org/wiki/Control_Systems/System_Identification

⁵ Vt. Wikipediast http://en.wikipedia.org/wiki/Systems_theory

⁶ Vt. Wikipediast <http://en.wikipedia.org/wiki/Stability>

mi täiesti uue kvaliteediga püsivasse olekusse. Sellist nähtust võime täheldada näiteks raadiovõnkumiste generaatoris (elektroonilises ostillaatoris) – kui lineaarne võimendi positiivselt tagasisidestada⁷, siis võib temast saada korrapärase võnkumiste stabiilne allikas (joonis 3.6). Positiivselt tagasisidestatud võimendi väljundi amplituud kasvaks lineaarsuse tingimustes lõpmatult, tegelikult ilmneb aga võimendi mittelineaarsus, mis stabiliseerib protsessi uue *ajalise struktuuri* – isevõnkumiste – tekkega. Võimendist saab generaator.



Joonis 3.6. Elektroonilise võimendi genereerimaminek.

Võimendi on positiivse tagasiside tõttu ebastabiilne. Tema poolt võimendatud signaali $X_2(t)$ amplituud kasvaks eksponentsiaalselt (katkendlikud jooned parempoolseil graafikuil), kuid sisendkarakteristiku $X_2 = f(X_1)$ mittelineaarsus piirab selle kasvu ja *võimendi muutub* stabiilse amplituudiga *generaatoriks*.

Tugevalt mittetasakaalulises süsteemis on protsessid intensiivsed, sõltuvused on kaugel nõrkadest (mis kirjelduksid lineaarselt), mispuhul ka vastavate mudelite võrrandites üldistatud jõudude kordajad ei ole enam sõltumatud jõududest, nagu see on lineaarses mittetasakaalulises termodünaamikas.

Lineaarsete võrrandite (3.2.0.4) asemel saadakse võrrandid

$$J_i = \sum_{j=1}^n L_{ij}(X_1, X_2, \dots, X_n) \cdot X_j, \quad (i = 1, \dots, n), \quad (3.3.1.1)$$

kus L_{ii} on nüüd mingid funktsioonid üldistatud jõududest X_i .

⁷ *Tagasisideks* nimetatakse süsteemi (nt võimendi) väljundist mingi osa tagasisuunamist selle süsteemi sisendisse. *Positiivne* on tagasiside siis, kui ta tugevdab sinna väljastpoolt toimivat sisendmõju, *negatiivne* – kui ta sisendit nõrgendab.

Tugevalt mittetasakaaluliste süsteemide jaoks ei saa küll anda ühist evolutsioonikriteeriumi – nii nagu ei saa olla ühesugust lahendusviisi kõigile mittelineaarsetele harilikele diferentsiaalvõrranditele – selleks on nende mitmekesisus liiga suur. Aga nagu juba nägime, on tugevalt mittetasakaaluliste süsteemide seas niisuguseid, mille evolutsioonis on olemas võimalus siirduda üle püsivuse piiri ja saavutada stabiilsus uue kvaliteedi juures.

3.3.2 Dissipatiivsed struktuurid

Selle valdkonna uurijate tuntumaid teaduskollektiive XX sajandil on olnud nn *Brüsseli koolkond* eesotsas Ilya Prigogine'iga, kellelt pärineb *dissipatiivsete struktuuride* kontseptsioon (põhjalikumaks tutvumiseks Brüsseli koolkonna ideedega vt [8], [9]).

Struktuuriks nimetatakse selle kontseptsiooni kohaselt ajaliselt või ruumiliselt korrastatud süsteemi või tema osa. Struktuursus on siin sama mis *organiseeritus* (vt lk 105). Dissipatiivsed struktuurid on termodünaamiliselt mittetasakaalulised struktuurid, mis toimivad stationaarses režiimis (st neid läbivad *püsivad* energia ja/või aine vood). Niisugused struktuurid tekivad materiaalse organiseerumise teel – tänu nendega haakuvatele aine või energia voogudele – ja läbivad oma evolutsiooni alguses mittestabiilsuse faasi, milles väikesed fluktuatsioonid saavad võimenduda. Mittestabiilsus suubub seejärel süsteemi mittelineaarsuse tõttu uude stabiilsusesse ja dissipatiivne struktuur eksisteerib edasi püsivalt tänu teda läbivaile voogudele. Iseloomulik on (sellest ka nimetus neile), et nad toodavad entroopiat eriti intensiivselt. Näiteks selliste struktuuride kohta on eelkõige elussüsteemid (vrd keskmist inimest Päikesega):

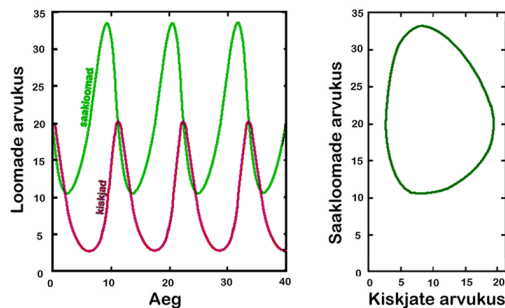
| Objekt | Keskmine dissipatsioon, W/kg |
|---------|------------------------------|
| Inimene | 1,4 |
| Päike | 0,00023 |

Loodetakse, et elussüsteemide teket ja olemasolu mehhanisme saab seletada dissipatiivsete struktuuride alusel. Seda näitab ilmekalt lõik Prigogine'i vaateid filosoofia vaatepunktist uurinud A. Metsa magistritööst [15], lk 15:

"Vanasti arvati, et organismide püsimine on vastuolus fundamentaalsete füüsikaseadustega, selle eest "vastutavad" mingid muud seadused, sest füüsikaseaduste järgi peaks nad lagunema hoopis kiiresti. Selline arusaam tulenes füüsikaseaduste identifitseerimisest evolutsioonina korrapäratuse suunas (tulenevalt termodünaamika teisest seadusest). Prigogine arvab, et nüüd me teame, et tegelikult ikkagi kirjeldavad füüsikaseadused ka organismide püsimist, aga need pole enam ainult staatiliste struktuuride seadused, vaid nüüd ka juba ebastabiilsete, muutlike struktuuride seadused, mis rakenduvad tasakaalukaugetele, iseorganiseeruvatele süsteemidele" [siin järgneb autori viide I. Prigogine'i ja I. Stengersi raamatule "Tõsikindluse lõpp: Aeg, kaos ja uued loodusseadused" [22], lk 83–84].

Mittelineaarse termodünaamika uurijate meelisobjektideks on olnud mitmed nn *emergentsinähtused*⁸. Selle põhjust seletab hästi Prigogine'i lause: "Vaadeldav korrastatus on mittepööratavate protsesside tulemus ja seda ei saaks saavutada tasakaalus." [22] lk 64 (Ave Metsa tõlge).

Sellisteks nähtusteks on nt kiskjate ja saakloomade populatsioonide arvukuse dünaamika, turbulents vedelike ja gaaside voolamisel, Bénardi efekt vedeliku termilisel konvektsioonliikumisel, keemias avas-



Joonis 3.7. Lotka-Volterra-tüüpi mudel kiskja ja saakloomade populatsioonide dünaamikast. Pärast algolekust lähtuvate siirdeprotsesside möödumist kujuneb välja stabiilne kahest kooskõolisest võnkumisest koosnev ajaline struktuur. Paremal on selle faasiportree.

⁸ *Emergentsiks* (ingl k *emergence* – esiletõus, ilmumine) nimetatakse mingi nähtuse prognoosimatut ilmnemist, toimumist oludes, milles ei peaks midagi sellist toimuma; millegi kvalitatiivselt uue ilmekat avaldumist. Termin on teadusesse toonud inglise XIX saj psühholoog G. H. Lewes, kes tähistas selle sõnaga midagi, mis ei sarnane oma lähteosadele ja ei ole taandatav lähteosade koostoime summaks või vaheks.

tatud Beloussovi-Žabotinski reaktsioon. Samad nähtused on olnud ka emergentsi ja sünergeetika uurijate ning füüsikute, bioloogide, keemikute ja matemaatikute huvi objektiks.

Kiskjate-saakloomade populatsioonide dünaamika on uurimisobjektiks olnud juba pikemat aega. Siin on klassikalised tulemused saanud ameerika matemaatik ja füsikokeemik Alfred Lotka (1925) ja itaalia matemaatik ja füüsik Vito Volterra (1926) (joonis 3.7). *Lotka-Volterra mudel* esitatakse kahe võrdlemisi lihtsa mittelineaarse hariliku diferentsiaalvõrrandi süsteemiga [39].⁹ Mudel on saanud üheks matemaatilise ökoloogia alusmudelitest.

Ka *turbulents* on teaduses ammu tõsiselt uuritud nähtus, hiljemalt alates George Gabriel Stokesist (1851) ja Osborne Reynoldsist (1883).



Joonis 3.8. Pilvkate Vaikse ookeani kohal Mehhiko California poolsaare ranniku lähedal. Näha on turbulentsete keeriste tee Guadalupe'i kaljusaare tagant rööbiti rannikuga. *NASA satelliitfoto, vt täpsemalt lk 158.*

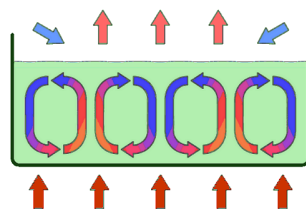
Siiski on ameerika füüsik, kvantelektrodünaamika rajaja Richard Feynman, kes 1980. paiku ka turbulentsiga tegeles, nimetanud turbulentsi klassikalise füüsika tähtsaimaks lahendamata probleemiks.

⁹ Vt http://en.wikipedia.org/wiki/Lotka-Volterra_equation

Turbulents ja keerised – korrastatud ajalis-ruumiliste struktuuride tekkimine ja püsimine (joonis 3.8) – on nähtus, mille seletamiseks võiks olulise panuse anda dissipatiivsete struktuuride teooria.

Bénardi efekt (Bénardi konveksioon) on *konveksioon*¹⁰ õhukeses vedelikukihis. See on üks enim uuritud konveksiooninähtusi, sest allub hästi teoreetilisele ja eksperimentaalsele uurimisele. Bénardi konveksioonil kujunevad vedelikus konveksioonirakud (joonis 3.9), mis võivad moodustada korrapäraseid dünaamilisi struktuure. Nende struktuuride tekkimine ja mustrid (vt joonis 3.10) on ilmekas näide mittelineaarsest iseorganiseerumisest [40].¹¹ Esimesena uuris seda nähtust prantsuse füüsik Henri Bénard 1900. a.

Beloussovi-Žabotinski reaktsioon on ostsilleeruv autokatalüütiline¹² keemiline reaktsioon, mis demonstreeb dünaamilise ajalis-ruumilise struktuuri teket. Reaktsiooni avastas 1959. a nõukogude keemik Boriss Beloussov. Avastatud peeti algul võimatuks. 1964.–1974. a jätkas uurimist ja teoreetilist seletamist ning avaldas selle maailmale Anatoli Žabotinski koos kaastöötajatega. Reaktsioon kujutab endast keemilist ostsillaatorit – perioodiliselt muutuva olekuga redutseerimis-oksüdeerimisprotsessi.

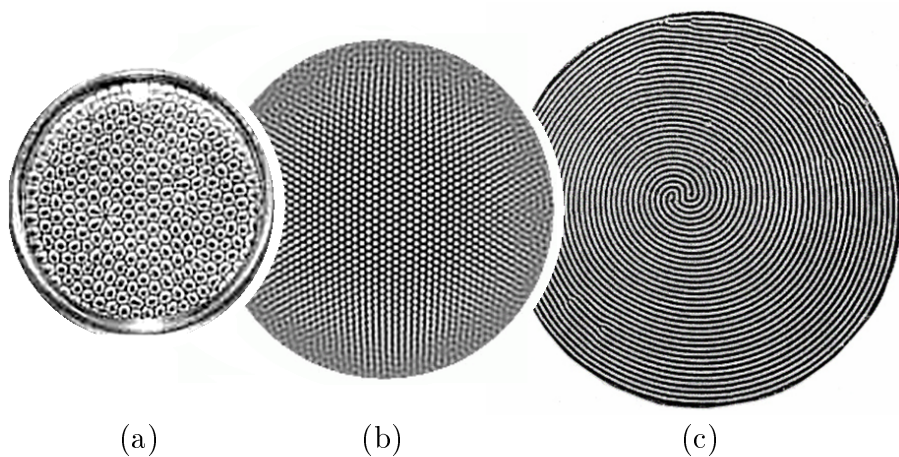


Joonis 3.9. Konveksiooni skeem Bénard'i efekti korral. Soojusvoo allikas on õhukese vedelikunõu all. Ülal toimub soojusvahetus keskkonnaga. Konveksioon tekitab raskusjõu tingimustes üksikute rakkude kujulised püsivad tsirkuleerivad struktuurid, mille piiride poolt moodustata vaid mustreid saab jälgida läbi nõu läbipaistva kaane. *Joonis Wikipediast* [40].

¹⁰ *Konveksiooniks* nimetatakse siin soojusülekanne, mis toimub kuuma või külma aine ruumis ümberpaiknemise tõttu; samuti tähistatakse selle sõnaga ka viimast ümberpaiknemist ennast.

¹¹ Vt Wikipediast http://en.wikipedia.org/wiki/Rayleigh-Bénard_convection

¹² *Autokatalüütilisteks* nimetatakse keemilisi reaktsioone, mille produktid toimivad samale reaktsioonile katalüsaatoritena. Katalüsaatorid on ained, mis toimivad reaktsioonile tema kiirust muutvalt. Võib öelda, et niisugused reaktsioonid on *tagasisidestatud*.



Joonis 3.10. Bénardi efekt. Kujutiste vähendus kasvab vasakpoolsest parempoolse poole.

(a) – foto efekti uurimise lihtsa katseseadme kaanest;

(b) – näide mesilaskärjesarnasest konveksioonimustrist;

(c) – näide spiraalsest konveksioonimustrist. *Fotod internetist erinevatelt autoritelt, vt lk 158.*



Joonis 3.11. Beloussovi-Žabotinski reaktsioon Petri tassi põhjas. Reaktsiooni front paikneb spiraalide ja kaarte servadel. Kujund evolutsioneerub ajas. *S. W. Morrise ja M. Rogersi foto, vt. lk 158.*

Protsess toimub lahuses, võnkumiste sagedus on suurusjärgus 0,01 Hz, ühe perioodi jooksul muutub lahuse värvus ühest värvusest kontrastselt teiseks. Sarnaselt Bénardi efektiga annab protsess õhukeses kihis teostatuna mustri, mis erineb konveksioonimustrist kuju ja värvi poolest ning areneb ja liigub (joonis 3.11).¹³

Tänaseks on leitud hulk reaktsioone, mis käituvad samamoodi. Vaatleme seda tüüpi reaktsiooni [23] järgi. Kui reagentidena kasutada mõnd bromaat (annab BrO_3^- -ioone), maloonhapet ($H_2C(COOH)_2$) ja katalüsaatorina tseeriumi (Ce) ioone, on reaktsiooni tuum¹⁴ järgmine:

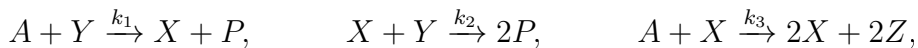


Reaktsiooni ajalise kestuse määrab algne bromaad hulk. Bromaad redutseerumise produktid, mis tekivad I reaktsioonil, ühinevad maloonhappega. See ühend laguneb peagi Br^- -ioonide vabastamisega. Need pidurdavad tugevasti I reaktsiooni ja väljuvad ise pikkamööda protsessist. Ce^{4+} kontsentratsioon langeb, ja kui see saab alla kriitilise, siis langeb ka Br^- kontsentratsioon. Nüüd algab taas I reaktsioon ja Ce^{4+} kontsentratsioon suureneb. Kui see saavutab ülemise kriitilise väärtuse, suureneb järsult Br^- kontsentratsioon ja I reaktsioon pidurdub, jne. Reaktsioon kulgeb ajas nii nagu joonisel 3.12 (a).

Kui tähistada

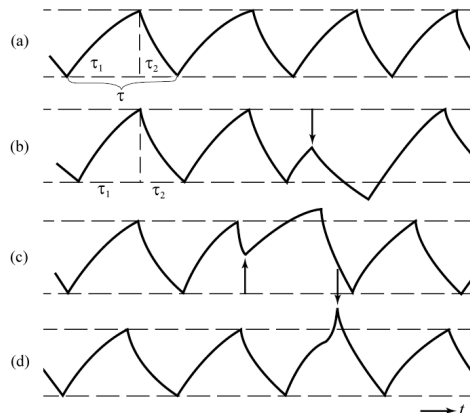


siis on reaktsiooni keemilised võrrandid esitatavad kujul



¹³ Vt. ka <http://www.flickr.com/photos/nonlin/sets/72157623568997798/>

¹⁴ Täpsemalt eristatakse Beloussovi-Žabotinski reaktsioonil küll vähemalt 11 etappi [23].



Joonis 3.12. Ce^{4+} kontsentratsiooni võnkumised Beloussovi-Žabotinski reaktsioonis: (a) – häirimata juhul, (b) – kui noolega märgitud hetkel lisatakse Br^- , (c) – kui noolega märgitud hetkel lisatakse Ag^+ , mis seob Br^- , (d) – kui lisatakse Ce^{4+} . Joonis [23]-st A. Žabotinski järgi (1974).

kus k_1, \dots, k_5 on reaktsioonide kiirused, ν on asjaolude kohaselt määratav stöhhiomeetriline tegur [32].

Nende reaktsioonivõrrandite alusel on koostatud reaktsioonide dünaamika võrrandid, mis moodustavad mittelineaarse harilike diferentsiaalvõrrandite süsteemi (nurksulud [] tähistavad reagendi kontsentratsiooni):

$$\begin{aligned}\frac{d[X]}{dt} &= k_1 \cdot [A][Y] - k_2 \cdot [X][Y] + k_3 \cdot [A][X] - 2k_4 \cdot [X]^2, \\ \frac{d[Y]}{dt} &= -k_1 \cdot [A][Y] - k_2 \cdot [X][Y] + \nu k_5 \cdot [B][Z], \\ \frac{d[Z]}{dt} &= k_3 \cdot [A][X] - k_5 \cdot [B][Z].\end{aligned}\tag{3.3.2.1}$$

Võrrandid (3.3.2.1) esitavad nn *oregonaatori* – matemaatilise mudeli (1975), mida saab kasutada isevõnkuvate keemiliste protsesside imiteerimiseks. Nimetus on moodustatud samal viisil nagu Brüsseli koolkonna poolt varem (1971) välja töötatud veidi lihtsama sama otsustarbega mudeli nimetus *brüsselaator* – viitega mudeli väljatöötamise kohale (vastavalt Brüsseli Vaba Ülikool ja Oregoni Ülikool) ning lõpuga sõnalt ”*ostsillaator*“. Kui keemilise reaktsiooni dünaamika kirjeldus

seotakse reagentide difusiooni kirjeldusega (siin läheb vaja osatuletitestega diferentsiaalvõrrandeid), siis saadakse mitmesuguseid ajas ja ruumis evolutsioneeruvaid dissipatiivsete struktuuride mudeleid. Nende uurimine on tänase tugevalt mittetasakaalulise termodünaamika (mittelineaarse termodünaamika, sünergeetika, mittelineaarsete süsteemide teooria, emergentsiuuringute jms) aktuaalne ülesanne.

Kokkuvõtteks võib tõdeda, et elussüsteeme uuriv loodusteadus tegeleb täna teoreetiliselt ja eksperimentaalselt süsteemide omaduste otsimisega, mis tulenevad nende mittetasakaalulisusest ja mittelineaarsusest, lootusega leida nende uurimisel uus lähenemisviis ammustele probleemidele elussüsteemide eksistentsi, funktsioneerimise, arenemise ja elu tekkimise kohta.

Peatükk 4

Informatsioon

4.1 Shannoni informatsiooniteooria

4.1.1 Pisut ajaloo

Kõige hiljemalt XIV sajandist on Euroopa rahvuskeeltes kasutusel *inform*-tüveline ladina keelest pärit (lad k *informare* – kuju vormima; mõtet kujundama) verb,¹ mille tähenduseks on olnud teada andmine, juhendamine, õpetamine, arusaamise kujundamine jms. Arusaamine informatsiooni mõõtmise tähtsusest hakkas aga välja kujunema alles 1920. aastail.

Kõnealune mõiste kujunes muidugi ajalooliselt. Alles pärast seda, kui mitmed senituntust erinevate aspektidega ilmingud hakkasid kuhjuma ja mõisteks kondenseeruma, tekkis ka termin *informatsioon*, mida nende spetsiifiliste erisuste kirjeldamise kaudu avatakse ja selgitatakse.

Püüdes neid informatsiooni mõisteks kondenseerunud ilminguid *pöördprojekteerida* saame loetleda terve rea omadusi, mis kõik on vähem või rohkem eriomased informatsiooni mõistele. Tabelis 4.1 ongi loetletud ajalooliselt informatsioonile omaseks peetud omadusi.

Tabelis loetletud omadustega detailselt tutvuja märkab aga sealsete omaduste omavahelist vastuolulisust. Näiteks väidetakse ühel real, et tegemist on millegi toimivaga, kuid juba järgmine rida postuleerib passiivne olemist.

¹ Prantsuse k *informer*, inglise k *inform*, saksa k *informieren*.

Tabel 4.1. **Informatsiooni määratlevaid omadusi**

| Omadus | Selgitusi |
|-------------------|---|
| kasutatav | Näiteks eesmärkide saavutamiseks. |
| teatena edastatav | Teade võib olla nii suuline kui ka kirjalik. Ka lillepott aknal võib olla teade. |
| salvestatav | Lisaks tavapärasele mahuvad siia ka kitsepabulad metsarajal jm. |
| pole jääv | Võib tekkida ja kaduda, edastamise järel jääb alles jne. |
| hävinev | Unustamine, salvestiste kasutamiskõlbmatuks muutumine. |
| transleeritav | Teise keelde tõlkimine, kirikute meetrikaraamatute digitaliseerimine jm. |
| tiražeeritav | Saame teha koopiaid. |
| muudetav | Saame lihtsalt muuta. |
| muutuv | Muutub aja jooksul ka ise. |
| toimiv | Sattudes õigel ajal õigesse kohta võib mägesid paigast liigutada. |
| passiivne | Iseseisvalt, ilma tõlgendajata ei saa toimida. |
| polüpotentsus | Kannab mitmeid erinevaid potentsiaale, millest igäühe realiseerumine sõltub välistest asjaoludest omamoodi. |
| väärtuslikkus | Seegi sõltub asjaoludest. |
| tõesus | Eriomadus, millel asjade puhul ei ole mõtet. |

Lähem analüüs näitab, et suurelt jaolt on segadus põhjustatud kahe erineva fenomeni – informatsiooni ja andmete – läbisegi käsitlemisega, nende eristamata jätmisega.

Need kaks on tihedalt seotud ja tavakeeles peetakse sageli sõnu *info(r)atsioon* ja *andmed* sünonüümideks, kuid nii infotehnoloogiliselt kui ka kõnesoleva kursuse raames on need erinevad mõisted, mida infotehnoloogia terminite standard EVS-ISO/IEC 2382-1:1998 määratleb joonisel 4.1 tsiteeritud viisil.

4.1.2 Informatsiooniteooria *Bell Laboratories*'ist

Katsed informatsiooni mõistet formaliseerida lähtusid sidetehnika arengust tulenevaist praktilistest vajadustest: suhteliselt mürarikaste ja algeliste andmeedastuskanalite kaudu sooviti võimalikult suuri andmehulki võimalikult lühikese aja jooksul veatult üle kanda.

Esimene dokumenteeritud katse informatsiooni mõistet matemaatiliselt formaliseerida pärineb 1924. aastast USA telefonitootja *Bell Laboratories* elektroonikainsenerilt Harry Nyquistilt (joonis 4.3). Nyquist arutleb andmeedastuse üle telegraafiinides [17] ja jõuab järeldusele, et kui kasutada senise kahe telegraafiini seisundi – vool on ja voolu pole – asemel rohkem seisundeid, näiteks erineva polaarsuse või ka erinevate konkreetsete voolutugevustega seisundeid, saab sama hulga teavet edastada märksa kiiremini. Kvantitatiivselt väljendab Nyquist *intelligentsi ülekandekiiruse* valemiga

$$W = K \cdot \log m,$$

kus K on konstant ja m signaali eristatavate väärtuste arv. Joonisel 4.2 on fragment sellest 1924. aasta artiklist.

Nelja aasta pärast, 1928. aastal, laiendas Nyquisti kolleeg, samuti *Bell Laboratories*'i elektroonikainsener Ralph Hartley (joonis 4.3) logaritmilise seose avaldist M -tähelise tähestiku ühe tähe poolt ülekantava informatsiooni mahule $I(sym)$:

$$I(sym) = -\log \frac{1}{M} = \log M. \quad (4.1.2.1)$$

Oluline erinevus Nyquistist on asjaolu, et ühe M -tähelise *tähestiku* tähe ülekandmine võib vajada mitmeid järjestikusi Nyquisti käsitletud elementaarülekandeid.

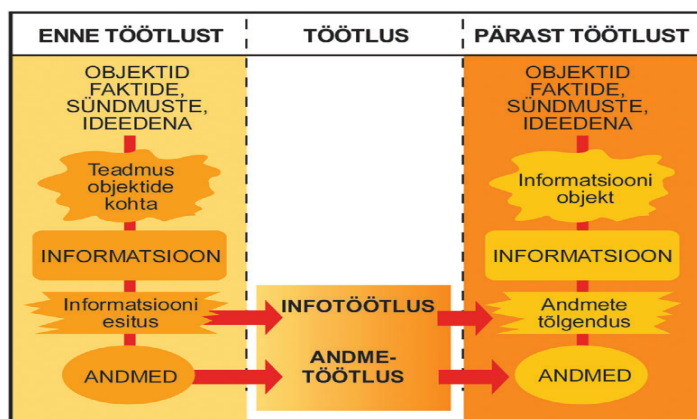
01.01.01 informatsioon ^a Teadmus, mis puudutab objekte, näiteks fakte, sündmusi, asju, protsesse või ideid, sealhulgas mõisteid, ja millel on teatavas kontekstis eritähendus.

Märkus: Vt joonist 1.

01.01.02 andmed ^b Informatsiooni taastõlgendatav esitus formaliseeritud kujul, mis sobib edastuseks, tõlgenduseks või töötluks.

Märkused:

1. Andmeid võivad töödelda inimesed või automaatsed vahendid.
2. Vt joonist 1.



Joonis 1: Informatsiooni ja andmete omavaheline suhe^c.

^a ISO standardi ingliskeelne sõnastus: 01.01.01 – information (in information processing) – Knowledge concerning objects, such as facts, events, things, processes, or ideas, including concepts, that within a certain context has a particular meaning.

^b 01.01.02 data – A reinterpretable representation of information in a formalized manner suitable for communication, interpretation, or processing.

^c Standardi originaaljoonis on must-valge, värvidega toonimata.

Joonis 4.1. Terminid *informatsioon* ja *andmed* infotehnoloogia terminite standardi EVS-ISO/IEC 2382-1:1998 järgi.

elements, may be determined approximately by the following formula, the derivation of which is given in Appendix B.

$$W = K \log m$$

Where W is the speed of transmission of intelligence,
 m is the number of current values,
 and, K is a constant.

By the speed of transmission of intelligence is meant the number of characters, representing different letters, figures, etc., which can be transmitted in a given length of time assuming that the circuit transmits a given number of signal elements per unit time.

Substituting numerical values in this formula gives the following table which indicates the possibilities of speeding up the transmission of intelligence by increasing the number of current values.

| Number of Current Values Employed | Relative Amount of Intelligence which can be Transmitted with a Given Number of Signal Elements |
|--------------------------------------|---|
| 2 | 100 |
| 3 | 158 |
| 4 | 200 |
| 5 | 230 |
| 8 | 300 |
| 16 | 400 |

Joonis 4.2. Fragment Harry Nyquisti 1924. a artiklist [17]

II maailmasõja tingimustes arendati praktilist elektroonilist andme-
 edastust erinevate riikide militaarstruktuurides. Mõistetavalt ei jõud-
 nud vastavad teoreetilised materjalid, kui neid oligi, akadeemilisse kir-
 jandusse.

Alles 1948. aastal avaldas matemaatikuharidusega elektroonika-
 insener Claude Elwood Shannon² (joonis 4.3) oma kaheosalise artikli
 “A Mathematical Theory of Communication”³ (*Kommunikatsiooni ma-
 temaatiline teooria*) [27]. Käsitleme seda tänapäevase informaatika
 oluliseks alustalaks olevat teooriat siinkohal veidi detailsemalt.

Shannon võttis arvesse, et tekstis esinevad erinevad tähed kann-
 vad üle erinevat infohulka, mis sõltub vastava tähe esinemissagedusest

² Ka Shannon töötas sellal firmas *Bell Laboratories*.

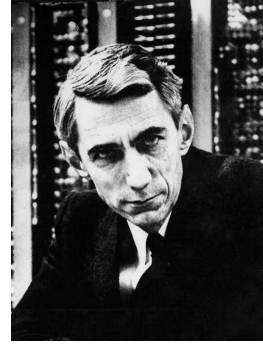
³ Artikkel on kättesaadav PDF-failina veebiaadressilt
<http://cm.bell-labs.com/cm/ms/what/shannonday/shannon1948.pdf>



Harry Nyquist
1889 Rootsi–1976 USA



Ralph Hartley
1888–1970, USA



Claude Shannon
1916–2001, USA

Joonis 4.3. *Bell Laboratories*'i insenerid, kes XX sajandi teises veerandis elektroonilise andmeedastuse probleeme lahendades töötasid välja tänapäevani vastu pidanud informatsiooni matemaatilise formalismi.

ülekantavates tekstides:

$$I(sym_i) = -K \cdot \log_q p(sym_i), \quad (4.1.2.2)$$

kus $p(sym_i)$ on tähe sym_i esinemissagedus (tõenäosus) ülekantavates tekstides ja kordaja K ning logaritmi alus q konstandid, millest sõltub informatsiooni hulga mõõtühik. Kui $K > 0$, saame $I(sym_i) > 0$. Analooiliselt saame N -tähelise teksti jaoks kirjutada

$$I(txt_N) = -K \cdot \log_q p(txt_N), \quad (4.1.2.3)$$

kus $p(txt_N)$ on konkreetse teksti txt_N esinemise tõenäosus. Kui tähestikus on M sümbolit⁴ ja i -ndat sümbolit esineb tekstis n_i korda, siis avaldub selle teksti esinemise tõenäosus $p(txt_N)$ üksikute sümbolite esinemise tõenäosuste $p(sym_i)$ kaudu järgmiselt:

$$p(txt_N) = \prod_{i=1}^M p^{n_i}(sym_i) \quad (4.1.2.4)$$

⁴ *Sümboliteks* peame lisaks tähtedele ka kirjavahemärke ja ülekandmisele kuuluvaid juhtsümboleid, nagu sõna- ning reavaheed ja tabulatsioonimärgid.

ning me saame arendada valemi (4.1.2.3) paremat poolt

$$\begin{aligned} I(txt_N) &= -K \cdot \log_q \left(\prod_{i=1}^M p^{n_i}(sym_i) \right) \\ &= -K \cdot \sum_{i=1}^M n_i \cdot \log_q p(sym_i) \end{aligned} \quad (4.1.2.5)$$

$$= -KN \cdot \sum_{i=1}^M \frac{n_i}{N} \cdot \log_q p(sym_i). \quad (4.1.2.6)$$

$N \gg 1$ korral $\frac{n_i}{N} = p(sym_i)$ ja

$$I(txt_N) = -KN \cdot \sum_{i=1}^M p(sym_i) \cdot \log_q p(sym_i). \quad (4.1.2.7)$$

Kui avaldise (4.1.2.7) mõlemad pooled läbi jagada teksti sümbolite arvuga N , saame pikas tekstis ühe sümboli kohta keskmiselt tuleva informatsiooni hulga jaoks valemi

$$\overline{I(txt_1)} = \frac{I(txt_N)}{N} \Big|_{N \gg 1} = -K \cdot \sum_{i=1}^M p(sym_i) \cdot \log_q p(sym_i). \quad (4.1.2.8)$$

Võttes sümboli sym_i esinemisageduse $p(sym_i)$ jaoks kasutusele kompaktsema tähistuse p_i ja fikseerides konstantide K ja q väärtusteks vastavalt $K = 1$ ja $q = 2$ saame kirjutada

$$\overline{I(txt_1)} = - \sum_{i=1}^M p_i \cdot \log_2 p_i. \quad (4.1.2.9)$$

Konstantide väärtused $K = 1$ ja $q = 2$ on valitud selliselt, et kahest võrdse tõenäosusega⁵ esinevast sümbolist⁶ moodustatavates tekstides kannaks iga sümbol keskmiselt ühe ühiku informatsiooni. Selle ühiku

⁵ Kumbki siis tõenäosusega $1/2$.

⁶ Näiteks sümbolid 0 ja 1.

nimetuseks on *bitt*, tähiseks bit. Tõepoolest $M = 2$, $p_0 = 1/2$ ja $p_1 = 1/2$ korral

$$\begin{aligned}\overline{I(txt_1)} &= - \sum_{i=1}^2 p_i \cdot \log_2 p_i = -p_0 \cdot \log_2 p_0 - p_1 \cdot \log_2 p_1 = \\ &= - \frac{\log_2 \frac{1}{2}}{2} - \frac{\log_2 \frac{1}{2}}{2} = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} = 1 \text{ (bit)}.\end{aligned}$$

Paneme tähele, et kui nende kahe sümboli esinemissagedused ei ole võrdsed, siis on ühe *binaarsümboli*⁷ kanda oleva keskmise informatsiooni hulk ühest bitist väiksem. Piirile minnes, st olukorras, kus esineb vaid üks sümbol, ei kanna selline binaarsümbol enam informatsiooni. Sellises olukorras on mõlemad avaldise (4.1.2.9) liidetavad nullid – üks seetõttu, et tõenäosus on null, teine aga seetõttu, et tõenäosuse logaritm on null. Vahepealsetel juhtudel, s.o olukorras, kus mõlemad sümbolid küll esinevad, kuid nende esinemissagedused ei ole võrdsed, kannab iga binaarjärk keskmiselt informatsiooni, mille hulk on vähem kui üks bitt.

Sama seaduspära kehtib ka pikemate tähestike korral:

***M*-tähelise tähestiku suurima infomahukusega kasutamine saavutatakse parajasti siis, kui kõikide tähtede kasutussagedus on ühesugune. Teistsuguste kasutussageduste korral on tegemist *andmeliiasusega*.**

Andmeliiasuse esinemisel tuleb valem (4.1.2.9) ümber kirjutada võrdusmärgi *nõrgendavalt*:

$$I \leqslant - \sum_{i=1}^M p_i \cdot \log_2 p_i. \quad (4.1.2.10)$$

Tänapäevased infotehnoloogilised vahendid opereerivad binaarsete andmeühikutega, millest igaühe olek saab sõltumata teistest olla kas

⁷ *Binaarne* – kahend-, nt binaararv – kahendarv, binaarsümbolid – arvu kahendkujul üleskirjutamiseks kasutatavad sümbolid.

0 või 1. Ka digitaalse informatsiooni salvestamiseks kasutatavad mälu-seadmed salvestavad andmeid binaarsete elementide olekuid fikseerides. Seejuures hinnatakse salvestatavat andmemahutu bittides.

Praktikas kasutatakse siiski suuremat ühikut – *baiti* ja selle kord-seid. *Baidi suurus* on ajalooliselt sõltunud arvuti arhitektuurist, kuid möödunud sajandi viimasest kümnendist kasutatakse põhiliselt *8-bitist baiti* ning tema kordseid 1000 või 1024 ($1024 = 2^{10}$) täisarvastmetega (vt tabel 4.2).

Tabel 4.2. **Baidi kordseid andmemahutude ühikuid**

| Baite | Nimetus | Tähis | Baite | Nimetus | Tähis |
|-----------|----------|-------|-------------------|----------|-------|
| 10^3 | kilobait | kB | $2^{10} = 1024$ | kibibait | kiB |
| 10^6 | megabait | MB | $2^{20} = 1024^2$ | mebibait | MiB |
| 10^9 | gigabait | GB | $2^{30} = 1024^3$ | gibibait | GiB |
| 10^{12} | terabait | TB | $2^{40} = 1024^4$ | tebibait | TiB |

Sageli unustatakse, et täidetud binaarsed mälupe-sad sisaldavad igauks *terve* biti informatsiooni ainult siis, kui mõlemad binaarväärtused esinevad võrdse sagedusega. Paraku see tingimus pole paljudel juhtudel täidetud, sest me valime informatsiooni salvestamiseks ena-masti kodeerimisviisi, mida on mugav kasutada. See asjaolu, et nn tavakodeeringute korral ei ole binaarväärtuste esinemissageduse võrd-suse tingimus enamasti täidetud, tähendab *andmeliiasust* – andmeid on rohkem kui nendega kodeeritud informatsiooni salvestamiseks mi-nimaalselt vaja oleks. Andmeliiasust on võimalik *tihedamat* kodee-rimisviisi kasutades vähendada – just seda teevad paljud archiveeri-mis- ja pakkimisprogrammid. Andmeliiasus pole siiski üdini nega-tiivne nähtus – lisaks eelnimetatud kasutamismugavusele võimaldab andmeliiasus ära hoida kadusid ja moonutusi andmetöötlusel, sh and-meedastusel ja salvestamisel. Asjaolu, et vaid suhteliselt väike osa häälikute (tähtede) võimalikest järgnevustest moodustab konkreet-ses keeles tähenduslikke sõnu ja vaid suhteliselt väikesel hulgal kindlates vormides ning järgnevustes sõnadel kõikvõimalikest suvalisetes vormi-des sõnajärjestustest on selles keeles tähendusi, võimaldab adekvaat-selt suhelda ka sellistes olukordades, kus näiteks kuuldavus on halb või rääkimine takistatud.

Shannon analüüsis inglise keele andmeliiasuse erinevaid aspekte oma eespool viidatud 1948. aasta põhjapaneevas töös, pakkudes seal välja mitmeid tähtede esinemissageduse analüüsil põhinevaid meetodeid andmete tihendamiseks inimkeelsete tekstide edastamisel.

4.1.3 Informatsioon ja entroopia

Tähelepanelik lugeja on juba märganud Shannoni informatsioonihulga avaldise (4.1.2.8) sarnasust Gibbsi entroopia avaldisega (2.1.3.1). Tabelist 4.3 on näha, et need avaldised ühtivad kahe konstandi – kordaja ja logaritmi aluse – ning nende valikust tuleneva mõõtühiku suuruse täpsusega.

Tabel 4.3. Shannoni informatsiooni ja Gibbsi entroopia valemid

| Nimetus ja viit | Valem | K | q | Ühik |
|----------------------------------|---|-------|-----|------|
| Gibbsi entroopia (2.1.3.1) | $S = -k_B \cdot \sum_{i=1}^M p_i \ln p_i$ | k_B | e | J/K |
| Shannoni informatsioon (4.1.2.9) | $I = -\sum_{i=1}^M p_i \log_2 p_i$ | 1 | 2 | bit |

Valemite selline kokkulangevus annab meile võimaluse väljendada entroopiat bittides ja informatsiooni džaulides kelvini kohta:

$$S_{bit}(\text{bit}) \stackrel{\text{def}}{=} \frac{S(\text{J/K})}{k_B \cdot \ln 2}, \quad (4.1.3.1)$$

$$S(\text{J/K}) = k \cdot \ln 2 \cdot S_{bit}(\text{bit}). \quad (4.1.3.2)$$

Sellele formaalsele ühtimisele vastavat sisulist entroopia ja informatsiooni ühise olemuse küsimust käsitles prantsuse päritolu USA füüsik Léon Brillouin (joonis 4.1.3) oma 1953. aasta artiklis “The Negentropy Principle of Information” [5]. Brillouin väidab, et teabe hankimine tuleb *kinni maksta* entroopia suurendamisega keskkonnas.

Selgitame seda mõttelise eksperimendiga, mille käigus uurime näiteks mingil sedelil olevat teksti. Olgu meile teada selle teksti kirjutamiseks kasutatud keele statistiline struktuur. Olgu sedelil N sümbolit. Siis saame koostada sellel sedelil võimalike tekstide ammendava hulga $\mathbb{M} = \{txt_N^1, txt_N^2, \dots, txt_N^{\mathcal{M}}\}$, mis koosneb \mathcal{M} erinevast võimalikust sõnumist txt_N^i ($i = 1, 2, \dots, \mathcal{M}$), mille esinemise tõenäosused on vastavalt p_i .

Gibbsi entroopiavalemi järgi on sedelil oleva teksti määramatus (entroopia)⁸

$$S_0 = - \sum_{i=1}^{\mathcal{M}} p_i \log_2 p_i > 0. \quad (4.1.3.3)$$

Sedelil oleva informatsiooni teadasaamisel määramatus kaob ja vastav entroopia S_1 muutub nulliks. Teadasaadud informatsiooni hulk I_1 avaldub valemi (4.1.2.10) järgi:

$$S_1 = 0, \\ I_{sõnum} \leq - \sum_{i=1}^{\mathcal{M}} p_i \log_2 p_i. \quad (4.1.3.4)$$

Kuna sõnumi määramatuse entroopia muut sõnumi teadasaamisel

$$\Delta S_{sõnum} = S_1 - S_0 = \sum_{i=1}^{\mathcal{M}} p_i \log_2 p_i < 0 \quad (4.1.3.5)$$

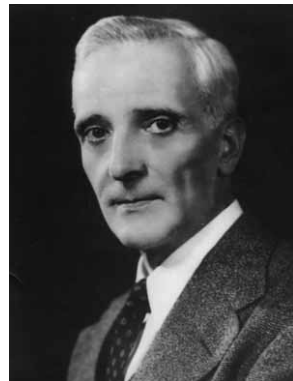
on negatiivne, siis peab termodünaamika teisele seaduse järgi muutama ka keskkonna entroopia $S_{keskkond}$ selliselt, et

$$\Delta S_{keskkond} + \Delta S_{sõnum} \geq 0.$$

Seega peab keskkonna entroopia kasvama vähemalt sama palju, kui palju vähenes sõnumi entroopia:

$$\Delta S_{keskkond} \geq -\Delta S_{sõnum}. \quad (4.1.3.6)$$

⁸ Kasutame edaspidi entroopia bittides väljendamisega korral indeksi *bit* vaid erilise rõhutamise tarvis.



Léon Brillouin
1889 Prantsusmaa –
1969 USA
Joonis 4.4.

Asendame siia $\Delta S_{sõnum}$ valemist (4.1.3.5) ja, kasutades võrratust (4.1.2.10), saame:

$$I_{sõnum} \leq -\Delta S_{sõnum} \leq \Delta S_{keskkond}. \quad (4.1.3.7)$$

Eelneva mõttekäigu aluseks oli *Brillouini printsiibina* tuntud eeldus, et

Gibbsi entroopia (2.1.3.1) ja Shannoni informatsiooni-valemid (4.1.2.9) kirjeldavad olemuslikult sama nähtust

$$I_{Shannon} \equiv -\Delta S_{bit}, \quad (4.1.3.8)$$

ning entroopia on teadmatuse mõõduks.

Seega, igasuguse teadasaamisega kaasneb universumi mingi lokaalse piirkonna (nt mingi elusolendi närvisüsteemi) entroopia vähenemine ja sellest lokaalsest piirkonnast väljapoole jääva keskkonna entroopia kasv.

4.2 Informatsiooniteooria kriitika

Nii Shannoni teooria kui ka eriti Brillouini informatsiooni negentroopiline printsiip on aja jooksul hulgaliselt kriitikat saanud. Vaatleme selles jaotuses neist etteheiteist olulisimaid.

4.2.1 *Vesi pole veis*

Kriitikud väidavad, et Shannon ei pööra mingit tähelepanu sümbolite järjekorrale, kui avaldab sõnumi tõenäosusi üksikute sümbolite tõenäosuste kaudu, kuigi sõnumit moodustavate sümbolite permuteerimisel sõnumi tähendus, s.t selles sisalduv informatsioon muutub. Tõepoolest, sõnades *vesi* ja *veis* on täpselt samad tähed, kuid erinevas järjestuses, ning seetõttu on nende informatsiooniline tähendus erinev.

Kriitikutel on osaliselt õigus. Teooria kaitseks saab siiski öelda järgmist:

- Shannoni informatsiooniteooria on välja töötatud eeskätt andmeedastuse insener-tehniliste probleemide lahendamiseks ning toonased edastusseadmed säilitasid sümbolite järjekorra aprioriselt. Seega, sõnade *veis* ja *vesi* edastamiseks kulubki täpselt ühepalju ressursi⁹, s.t nende infomaht selles kontekstis ongi ühesugune.
- Juba 1948. aasta artiklis on tegelikult sõnumi sümbolite järjestyse teemat käsitletud tinglike tõenäosuste kaudu – sümboli esinemistõenäosuse jaoks kasutatakse ühe väärtuse asemel tervet rida väärtusi olenevalt sellest, milline sümbol sellele vahetult eelnes. Nii ei muutu valemi (4.1.2.9) kuju ega sisuline tähendus. Küll aga on teistsugune sõnumi moodustamiseks kasutatavate sümbolite hulk ja esinemissagedus.

Tõepoolest, olgu tähestikus M tavasümbolit¹⁰ $\{sym_1, sym_2, \dots, sym_M\}$, jagame iga sümboli sym_j olenevalt sellest, millise sümboli järel see esineb, M erinevaks laiendatud sümboliks $sym_{k,j}$. $sym_{k,j}$ tähistab seega sümbolit sym_j , mis asub vahetult sümboli sym_k järel. Ka laiendatud sümbolite $sym_{k,j}$ jaoks saame arvutada nende esinemissagedused $p_{k,j}$ sisulist tähendust omada võivates sõnumites. Võttes indeksipaari $_{k,j}$ jaoks kasutusele kompaktsema, ilma komata tähistuse, näeme, et valem (4.1.2.9) on kasutatav ka laiendatud sümbolite kasutades – lihtsalt erinevaid sümboliteid on M asemel M^2 ja valem arvestab sõnumis juba naabersümbolite omavahelise järjestysega.

Seda skeemi saab põhimõtteliselt jätkata ka pikematele sümbolijärgnevustele. $sym_{k,j,m}$ on siis laiendatud sümbol, mis vastab sym_m esinemisele $sym_{k,j}$ järel ning $p_{k,j,m}$ on selle esinemistõenäosus keeles jne. Lubades paralleelselt erinevate indeksite arvuga laiendatud sümboliteid ja kasutades ainult selliseid, mille esimesele indeksile vastab *täitesümbol* ning mis ise esinevad täitesümboli

⁹ NB! Sümboli edastamiseks on see vaja kodeerida ja erinevate sümbolite koodid võivad edastamiseks vajada erineval hulgal ressursi – aega ja/või energiat. Näiteks möödunud sajandi esimeses pooles laialt kasutusel olnud punktidest ja kriipsudest koosneva Morse'i koodi (morsekoodi) kasutamisel on E-tähe edastamiseks vaja edastada vaid üks punkt, U-tähe edastamiseks aga kahele punktile järgnev kriips ja numbri 0 edastamiseks viis kriipsu.

¹⁰ Tavasümbolite hulka kuulub ka nn *täitesümbol* – sõnavahe.

ees, saame laiendatud sümboliteks keeles esinevate sõnade hulgaga.¹¹

Just nii viisi sai Shannon oma töös kõigepealt morsekoodi punktidest, kriipsudest ning vahedest kui *pärissümbolitest* laiendamise teel kirjakeele tähtedele vastavad laiendatud sümbolid, ilma et tähed A ja N segi oleksid läinud.¹²

- Rääkides sõnumitest kui tähtedest koosnevatest tekstidest, on kriitikud vaikimisi eeldanud, et sümboliteks on tekstide koostamisel kasutatud tähed. Tegelikult aga Shannoni informatsiooni-teoorias sellist eeldust pole.¹³ Teooria (ja ka valemi (4.1.2.9)) kontekstis saab *sümboliteks* lugeda ka näiteks

- morsekoodi punkte, kriipse ja neid eraldavaid vahemikke või siis binaarsetuse 0-sid ja 1-sid,
- tähti, numbreid, kirjavahemärke ja tühikut,
- sõnu ja kirjavahemärke,
- terveid lauseid,
- ...

Võttes need laiendatud sümbolid *põhisümboleiks*, saab eelmises punktis kirjeldatud viisil moodustada uusi *laiendatud sümboleid*. Nii viisi moodustub terve sümbolikandidaatide *hierarhia*, mida saame vajadusel täiendada ning millest saame informatsiooni-teooria sümboliteks defineerida parajasti sellised struktuurid, mille korral kõik konkreetse rakenduse seisukohalt olulised sisestruktuurid seosed säilivad.

Seega pole väide, et teooria ei arvesta sümbolite järjekorda, teooria praktilise kasutuse seisukohalt oluline ja viitab pigem teooria väärikasutusele, kui sisulisele probleemile.

¹¹ Sõjajärgses Belli laboris oli olukord ühe taseme võrra lihtsam – pärissümboliteks, millega sõnumeid edastati, olid morsetähestiku kriipsud, punktid ja vahed ning analüüsiti neist moodustuvate laiendatud sümbolite ehk siis tähtedega numbrimärkide esinemissagedusi ja informatsiooni kandmise võimet.

¹² Nende tähtedega morsekoodid on vastavalt *punkt-kriips* ja *kriips-punkt*.

¹³ Juba eelmises punktis me nägime, et tähtedega asemel võib sümbolina käsitleda kindlale tähejale järgnevaid tähti. Näiteks *a*-le järgneb *i* ja *e*-le järgneb *i* on erinevad sümbolid $sym_{a,i}$ ja $sym_{e,i}$.

4.2.2 Valge müra paradoks

Shannoni informatsiooniteooria väidab, et sõnumi infomaht on maksimaalne, kui seda moodustavad sümbolid esinevad kõigis võimalikes sõnumeis statistiliselt ühesuguse sagedusega.¹⁴ Signaalitöötluses tunneme aga *valge müra* mõistet, mis on defineeritud kui signaal, mille spektri kõik komponendid on ühesuguse intensiivsusega. Eelnevast saaksime teha järelduse, et kõikvõimalikest etteantud spektraalpiirkonda jäävatest signaalidest on suurim informatsioonisaldus just valge müral.

Konstrueerime sõnumite hulga, mis koosneb N binaarühiku pikkusest sõnumitest. Kasutame iga konkreetse binaarsümboli väärtuse määramiseks mündiviskamist – *kullile* vastaku 0 ja *kirjale* 1. See tagab, et mõlema sümboli esinemissagedus kõikvõimalikes sõnumes on piisavalt täpselt 50% ja iga konstrueeritud sõnumi informatsioonisaldus valemi (4.1.2.10) järgi

$$I_{Shannon} = N \cdot \overline{I(txt_1)} = N \cdot (1/2 + 1/2) = N \text{ (bit)}. \quad (4.2.2.1)$$

Teisalt me teame, et need sõnumid on tegelikult formeeritud juhuslike, tähendust mitteomavate binaarväärtustega, s.t et nad ei sisalda otseselt kasulikku informatsiooni. Enamgi veel, moodustub valge müra, kui seda sõnumihulka edastada signaalina, millel on N erinevat sageduskomponenti, millest igaüks esineb kahe võimaliku intensiivsusega sõltuvalt sellest, kas parajasti edastataval sõnumil on vastav järk 0 või 1 ja iga üksiku sõnumi edastamine kestab ühesuguse, kõigi intensiivsuste määramiseks piisava ajaintervalli.

Kuna igas sagedusribas on mõlema intensiivsuse esinemine konkreetsel ajahetkel võrdtõenäoline, siis on kõigi sageduste intensiivsused statistiliselt ühesugused. Seega mündiviskamisega konstrueeritud sõnumihulga edastamiseks moodustuv signaal on definitsiooni järgi valge müra:

$$I_{kasulik} = 0 \text{ (bit)}, \quad (4.2.2.2)$$

mis on vastuolus tulemusega (4.2.2.1).

¹⁴ Vt lk 44, kus on arutlusel samasuguse funktsiooni maksimumi tingimus.

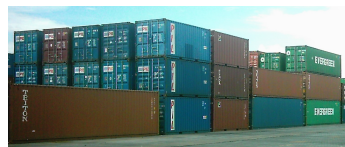
Asjaolu, et $I_{kasulik} \neq I_{Shannon}$, peetakse informatsiooniteooria paikapidamatuse tõendiks, “sest see teooria annab meelevaldseid, sealhulgas ebaadekvaatseid tulemusi”. Paraku pole kriitikud tähele pannud, et juba oma 1948. aasta artiklis räägib Shannon informatsiooni erinevatest kodeerimisvõimalustest ja enamiku kodeerimisviisidega kaasnevast suuremast või väiksemast andmeliiasusest (vt ka arutelu avaldise (4.1.2.10) saamise juures), mistõttu

$$I_{kasulik} \leq I_{Shannon}. \quad (4.2.2.3)$$

Selle võrratuse sisust arusaamisel on abiks konteineravedude näide. Kaubavedudel on standardimiseks kasutusele võetud *konteinerid*, mida saab vedada nii laevade, rongide kui ka autodega, neid saab paigutada tihedalt, külj külje kõrval ilma vahedeta ja neil on kindel, lihtsalt arvestatav ruumala. Shannoni informatsiooniteooria sõnumid on samasugused konteinerid, mis võivad sisaldada informatsiooni sarnaselt sellega, kuidas päris konteinerid võivad sisaldada kaupu. Nii nagu kaupade korralgi, ei pea konteinerit tihedalt täis laduma. Sõltuvalt asjaoludest võib olla mõistlik või lausa vajalik poollikute või isegi tühjade konteinerite saatmine. Kuid ühelgi juhul pole konteinerisse võimalik rohkem panna, kui see mahutab. Seega annab valem (4.1.2.9) infokonteineri mahtuvuse ja võrratused (4.1.2.10) ning (4.2.2.3) väljendavad asjaolu, et kasutamiseks ei pea infokonteiner *täis* olema – kasuliku informatsiooni maht saab olla arvutatud mahust väiksem, kuid mitte suurem. Asendades $I_{kasulik}$ ja $I_{Shannon}$ väärtused valemis (4.2.2.3) vastavalt valemitest (4.2.2.1) ja (4.2.2.2), saame

$$0 \leq N. \quad (4.2.2.4)$$

Näeme, et mingit vastuolu ei ole. 4-GiB mälu pulgale saab panna *kuni* 4 GiB informatsiooni, kuid selle saab ka näiteks seal varem olnud informatsiooni varjamiseks täita vähem või rohkem valge müraga. Sellisel valge müraga täitmisel on isegi oma funktsioon – selle sisse saab peita hästi (s.t võimalikult tihedalt) kodeeritud informatsiooni.



Joonis 4.5. Merekonteinerid sadamas. Igaüks neist ühesuurustest konteinereist võib sisaldada kuni 33 m^3 kaupa, aga võib ka täiesti tühi olla.

4.2.3 Raamatukogu teeklaasis

Kui valge müra paradoksis heideti informatsiooniteooriale ette meelevaldsete tulemuste saamist, siis selles paradoksis esitatakse konkreetne võrdlus ja tulemuse absuursusest järeldatakse Brillouini printsiibi mittekehtimine, s.t eitatakse termodünaamilise ja informatsioonilise entroopia üksühest seost.

Kriitikud võrdlevad maailma trükisõnas talletatud informatsiooni hinnangut entroopia vähenemisega teeklaasis selle jahtumisel kõigest ühe kraadi võrra. Alustame lihtsamast.

Teeklaasi jahtumine ühe kraadi võrra

Lähteandmeteks vajame veehulka teeklaasis ning selle soojusmahtuvust. Kasutame üldteada ligikaudseid väärtusi 200 grammi ja 4,2 kJ/kg. Entroopiamuudu arvutamiseks vajalikuks süsteemi temperatuuriks võime lugeda toatemperatuurist veidi kõrgemat väärtust 300 K. Saame:



Joonis 4.6. Teeklaas

$$\begin{aligned}\Delta S_{teeklaas} &= \frac{\Delta Q}{T} = \frac{m \cdot c_m \cdot \Delta T}{T} = \\ &= \frac{0,2 \text{ kg} \cdot 4,2 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 1 \text{ K}}{300 \text{ K}} \approx 3 \text{ J/K} .\end{aligned}$$

Valemit (4.1.3.1) kasutades väljendame selle bittides:

$$\Delta S_{bit,teeklaas} = \frac{3 \text{ J/K}}{k_B \ln 2} \approx 3 \cdot 10^{23} \text{ bit}.$$

Maailma raamatutesse kogutud informatsioon

Teisalt püüame hinnata maailma raamatukogudesse talletatud teabehulka. Selleks teeme hulganisti lihtsustusi. Näiteks ei arvesta tiraažiga ja loeme, et kogu teose teave on olemas igas eksemplaris. Teiseks teeme

väga jämeda eelduse, et raamatute loomine on toimunud ühtlases tempos – keskmiselt 10000 uut raamatut igal aastal ja seda juba viimased¹⁵ 3000 aastat. Võtame teadmiseks, et me võime selliselt toimides veidi üle hinnata, ja kui tulemus osutub liiga suureks, siis tuleb seda eeldust korrigeerida. Lugesdes keskmise raamatu mahuks 500 lehekülge, igaüks keskmiselt 6000 tähemärgiga, saame 8-bitiste tähemärkide¹⁶ korral kogu senise kirjasõna infomahule järgmise hinnangu:



Joonis 4.7. Raamatukogu.

$$\Delta S_{bit,raamatud} = 3000 \text{ a} \cdot 10^4 \frac{\text{raamat}}{\text{a}} \cdot 500 \frac{\text{lk}}{\text{raamat}} \cdot 6000 \frac{\text{täht}}{\text{lk}} \cdot 8 \frac{\text{bit}}{\text{täht}} \approx 7 \cdot 10^{14} \text{ bit}$$

Üllatus-üllatus – vaatamata sellele, et me kartsime raamatutarkuse ülehindamist, osutus see 8,5 **suurusjärku väiksemaks** kui entroopia vähenemine teeklaasi jahtumisel kõigest ühe kraadi võrra.

Kriitikute arvates on selle tulemi sõnum üheselt selge – informatsioonilisel ja termodünaamilisel entroopial pole sisulist seost, Brillouini printsiip ei pea paika ja vastavate valemite sarnasus on juhuslik.

Ka siin peitub oluline osa lahendusest võrratustes (4.1.2.10) ja (4.2.2.3) ning valge müra paradoksi juures selgitatud konteinerimudelil. Meie tulemus ei väida, et teeklaasi jahtumisel ühe kraadi võrra vähenenud entroopiasse on kodeeritud $3 \cdot 10^{23}$ bitti informatsiooni, vaid et sellesse pole põhimõtteliselt võimalik rohkem teavet kodeerida.

Siinkohal on oluline meenutada, et kodeeritud infost arusaamise võime on subjektiivne – näiteks kirjaoskamatu jaoks ei ole ühegi raa-

¹⁵ Paneme tähele, et kriitikud tegutsesid põhiliselt XX sajandi kolmandas veerandis ja neid ei vaevanud probleemid Interneti ja digitaalsete andmevõrgude vahetusest raamatukogudega.

¹⁶ Jällegi mõõdukas ülehindamine. 8 binaarsümboli kasutamisel tähemärgi esitamiseks jaotuvad binaarsümbolite väärtused ebaühtlaselt ja seega on nende info sisaldus väiksem kui 1 bit.

matu tekstis¹⁷ mingit teavet. Veeklaasi kätkeka võiva informatsiooni suhtes aga on kõik inimesed, vähemalt ilma sellekohase erivarustusega, lihtsalt *kirjaoskamatud*. Toonased kriitikud oleksid ju naeruvääristanud igaüht, kes oleks väitnud, et mõnele ruutmillimeetrile rāni pinnale on võimalik salvestada tuhandete nn *keskmise* raamatute tekste või tuhandeid värvifotosid või mitu täispikka värvilist ja mitmetes keeltes heliga mängufilmi. Paraku on inimkond arenenud ja õppinud seda tegema – sobilikke rāniplaadikesi sisaldavad mālupulgad ja -moodulid on praegu laiatarbekaup. Tōsi, informatsiooni salvestamiseks ja kättesaamiseks neilt rāniplaadikestelt on vaja eriseadmeid – arvuteid, nutitelefone ja/või digitaalseid fotoaparaate.

Paneme tähele, et kirjaoskus eeldab, et kirjatāhtede suurus jääb mingisse mõistlikku vahemikku ning et tähe kirjapanemiseks ja ka āratundmiseks vajaliku aja kulu on mõistlik või meil on tehnilised vahendid, mis muudavad algselt teistsugused kirjatāhed just sellisteks. Seejuures mõistlikud suurused tulenevad meie enda suurusest ja elueast: tāhed, mis on meie enestega võrreldes võrratult väiksemad või ka suuremad, jäävad meie poolt märkamata. Ilma abivahenditeta jäävad märkamata ka tāhed, mille eluiga on tūhisväike või mille āratundmiseks kulub aastakümneid.

Tulles tagasi teetassis ilmnenuu üüratu infokonteineri juurde, pole praeguste teadmiste põhjal lootust, et vedelasse vette hakataks mingeid andmeid praktilisel eesmärgil salvestatama, sest nii tāhed ise kui ka nende eluiga oleksid meie jaoks liiga väikesed, isegi abivahendeid kasutades. See tegevus oleks üsna sarnane rannaliivale kirjutamisega, kus kirjapandu juba vähegi mahukama teate kirjapanemise käigus lainete laastava toime tõttu otsast hävima hakkab.

¹⁷ Raamatutes on tegelikult lisaks tekstidele ka pildid. Muuhulgas leidub trūkiseid, milles sisalduva informatsiooni põhiosa ongi graafiline – näiteks kaardid ja atlased. Seega oleme raamatukogu infomahtu tugevalt alla hinnanud.

4.3 Informatsiooni semantiline külg

Claude Shannoni sideteooriaga toodi 1948. a termin *informatsioon* täppisteaduslikku teoriasse. Ka elussüsteemide uurijate poolt võeti see uuendus vastu kui “oodatud troonipärija”. Ammu enne informatsiooniteooria algatamist oli selge, et informatsioon on oluline vahend elussüsteemide adaptatsioonis. Mida aga tähendab “informatsioon”?

XX saj lõpul sai selgeks, et edaspidi tuleb teha vahet informatsioonil ja andmetel (näidet selle seisukoha tulisest argumentatsioonist vt [6]). Andmed – need on informatsiooni esitus materiaalsel kandjal. Aga sellealaste teadmiste kasvamisel vajame kindlasti vastavate mõistete hulgas edasist diferentseerimist.

Seoses asjaoluga, et elussüsteemid kasutavad oma elutegevuses andmetesse kodeeritud (või kodeerunud) “teadmist” või koguni “arusaamist”, mille kohta samuti kasutatakse nimetust *informatsioon*, vaatleme järgnevalt terminit *informatsioon* semantiliselt¹⁸ tähenduses.

Üks küberneetikateaduse algatajaid, ameerika matemaatik Norbert Wiener on (samuti 1948. aastal) kirjutanud: “*Informatsioon on informatsioon, aga mitte aine ega energia.*”

Tõepoolest: informatsioon vajab tõlgendajat (interpreeti); võib öelda, et kui pole tõlgendajat, siis pole tekstis informatsiooni. Interpreedita on tekst üks variant sümbolite segadust. Ta ei ole süsteemi üks vähestest korrapärasest olekutest, vaid on üks paljudest korrapäratutest olekutest. Tõlgendaja *tunneb ära* teksti mõtte. Üks ja seesama tekst võib olla erinevate tõlgendajate jaoks erineva väärtuse ja ka erineva mahuga. Informatsiooni saab soodsas keskkonnas laiendada: analüüsiga võidakse avastada uusi järeldusi, mida esialgne informatsioon ilmsel viisil ei sisalda – seda võtet kasutab teadus. (Laiendamisel saadava info usaldusväärsus väheneb alginfost kaugenemisega – see põhjustab vajaduse kontrollida teooriaid katseliselt.) Informatsiooni hankimine, tõlgendamine, kasutamine ja laiendamine on elussüsteemidele eriomased nähtused.

Kokkuvõtteks: *informatsioon on teistsugune entiteet kui füüsikalised entiteedid.*¹⁹

¹⁸ *Semantika* on teadus (keeleteaduse osa), mis tegeleb märkide, sõnade, väljendite tähendusega.

¹⁹ *Entiteet* – *filos.* olemasoleva element v külg (nt asjad, protsessid, omadused).

Eesti NSV ülikoolides õpetati *dialektilise materialismi* kursustes, et maailm jaguneb kaheks vastandlikuks olluseks – materiaalseks ja ideaalseks. Materiaalne maailm, mis hõlmati kategooriaga “*mateeria*”, on objektiivne, s.t inimese teadvusest sõltumatult olemas olev; ta on inimesele antud meelte kaudu ja eksisteerib väljaspool inimese teadvust. Materiat peetakse selle kontseptsiooni kohaselt iseliikuvaks – *liikumine* on materia *atribuut* ehk võõrandamatu omadus. Sellisena oli materia vastandatud teadvuse sisule. Viimast klassifitseeriti mõistega “*ideaalne*”. Selles filosoofias kirjeldati ideaalsust nii [7]:

“*Ideaalne on objektiivse reaalsuse subjektiivne kujutis*, s.t välise maailma *peegeldus* inimese tegevuse vormides, tema teadvuse ja tahte vormides. Olla subjektiivseks kujutiseks – see ei tähenda olla individuaal-psühholoogilise tegevuse tulemus, veel vähem tähendab see – olla füsioloogilise tegevuse tulemus. Ideaalne – see on inimkonna kogu sotsiaalse arengu ajaloo tulemus ja vorm.

Kui *materiaalne* on objektiivne reaalsus, siis *ideaalne* ei saa olla midagi muud kui subjektiivne reaalsus.

[Materiaalne on ideaalse suhtes primaarne:]²⁰ Kui [me teame, et] ideaalne on alati seotud materiaalsega (mateeriaga), siis samas ei saa väita, et materiaalne oleks tingimata seotud ideaalsega.”

Kui vaadelda semantilise informatsiooni omadusi dialektilise materialismi seisukohast, siis klassifitseerub see ideaalsete entiteetide hulka. Kohe pärast Eesti Vabariigi taas iseseisvaks kuulutamist ja väliskirjanduse vaba juurdevoolu avanemist selgus, et materia ja teadvuse, materiaalse ja ideaalse, objektiivse välismaailma ja subjektiivse sise maailma binaarse opositsiooni kohta on Läänes välja arendatud hulk teooriaid, millest mõned langevad põhiosas kokku dialektilise materialismi objektiivse materiaalse maailma ja teadvuse (s.t subjektiivsuse või ideaalsuse) vastastikuse seose ja suhte teooriaga, mitmed teised hästi argumenteeritud teooriad aga on sellest erinevad (vt V. Parve [19]).

Dialektilise materialismi *ideaalne* on miski, mis on olemisvõimeline vaid inimajus indiviidi subjektiivse reaalsusena. Mis on *ideaalne* ja

²⁰ *Nurksulgudes on täiendused konspekti autoritelt.*

subjektiivselt reaalne, see jääb selles teoorias ebaselgeks – deklareeritakse vaid, et tegemist on objektiivse reaalsuse peegeldusega inimese ajus. Jääb ebaselgeks, mil viisil tekib ideaalse (teadvuse) side objektiivse reaalsusega ja miks ta saab sobituda objektiivse reaalsusega. Lääne mõtteteaduses ei kasutata sõnaliselt jaotust materiaalseks ja ideaalseks.

Järgnevalt refereerime üht käsitlust [28], milles on püütud edasi liikuda dialektilisele materialismile omastest puudujääkidest ideaalsete nähtuste küsimustes. On tõenäoline, et töö, mida selle autor Mihhail Suhharev nimetab 1986. a trükiks ettevalmistatud (aga trükiluba mitte saanud) referaadiks, on kirjutatud Läänes tuntud kontseptsioonide mõjul. Järgnev on kompilatsioon tööst [28] valitud ja kohati ümber järjestatud tsitaatidest.

“... kui me hakkaksime metslast veenma selles, et arvuti töötamise põhjuseks on materia liikumine temas, siis ta, vaadates jäigalt plaatidele kinnitatud mikroskeeme, rõõgataks: “Aga seal ju ei liigu miski!” Umbes samasugune on tänapäeva [nõukogude]²¹ filosoofide seisukoht, kes kinnitavad, et ideaalne ei ole aju materia liikumine. Neil on tugev ja õige, kuid valesti tõlgendatud argument: ideaalse tähendus ei ole aju materias; ei ole ju arvutis oleva informatsiooni (näiteks palgaarvestuse) tähendusel (peaaegu) mingit seost arvuti enese materiaga; sellegipoolest on selle materia liikumise kord kõige otsesemalt seotud raha liikumisega kassas, seotud materia korrastatud liikumiste eesmärgiga: elektronide omaga arvutis, nõelte omaga trükkiseadmes, mis väljastab maksekorralduse, selle korralduse liikumisega kassasse ja lõpuks kassiiri liigutustega raha lugemisel.

Objektiivse reaalsuse üleüldised omadused on materiaalsus, liikumine ja liikumise kord [ehk viis, laad, mood(us), seadus(pära)]. Materia liikumise korra [viisi, laadi, mooduse, korrapära, struktuursuse, organiseerituse, organisatsiooni] tähtsus kerkib meie ette kogu oma suuruses alles

²¹ *Nurksulgudes on täiendused konspekti autoritelt.*

viimasel ajal. Edasine tootmisvahendite täiustamine osutub olevat seotud tehisintellekti loomise probleemiga, aga see – omakorda ja paratamatult – on seotud filosoofia põhiküsimusega mateeria ja teadvuse vahekorra kohta. ... Me ei hakka siinkohal esitama kategooria "kord" definitsiooni, sest defineerida seda, taandades selle veel üldisemale, on võimatu.

Ettekujutus liikumisest kui liikumisest üldse kannatab metafüüsilisuse all. *Liikumine on alati vahekordade korra muutumine mittehomogeenses mateerias* ja seetõttu on ta korrakohane liikumine. ... Korda [viisi, laadi, moodi, moodust, struktuuri, organiseeritust] saab mateerias üle anda – ühelt asjalt teisele – liikumise tulemusena.

Tähtis on mõista, et mitte mingi keeruliselt organiseeritud asi ei teki juhuslikult, seda enam hulk samaliigilisi asju. Kord ei teki äkitselt. ... igasugusel looduslikul asjal – olgu see molekul, täht või inimene, on oma korra tekkimise ajalugu, see on tema mateerias liikumise ajalugu. Iga keha sisaldab hiigelkoguse sisemisi kordasid... [Nende uurimisel] pole idealismi teeneks küll niivõrd seaduspärase liikumise avastamine, vaid peamiselt – seaduspärasuse liikumise avastamine.

Seadus, kord on samamoodi mittemateriaalne ja materiaalne ühtaegu, nagu ka liikumine; see dialektiline vastuolu tekitab kahte sorti vigu – esimene: kuna kord kandub üle ilma mateeriata²², siis [võidakse arvata, et] ta võib eksisteerida ilma viimaseta ([see viga oleks] idealism); teine: kuna kord on alati mateeria kord, siis [võidakse arvata, et] teda ei saa eraldada/eristada mateeriast ([see viga oleks] metafüüsiline materialism²³).

²² Suhharev peab ilmselt silmas, et kord, s.o struktuur, "tuuakse kohale" materiaalsel kandjal, kuid "uude asukohta", nt aju liikumisele kandub (osaliselt ja mingite moonutuste ning müra lisanditega) üle vaid struktuur, "mitte aine ega energia".

²³ *Metafüüsiline materialism* on dialektilises materialismis kasutatav nimetus materialistliku õpetuse primitiivsele kujule. Suhharev kasutab 1986. aastal veel tollaseid termineid.

Seoses sellise pöördega tekib küsimus: mille alusel peaksime rääkima mateeria primaarsusest? [Mis alust on meil väita mateeria primaarsust ideaalsete nähtuste suhtes, kui “ideaalne” on seesama, mis mateeria kord – on mateeria atribuut (paratamatu omadus)? | Ideaalsel ja materiaalsel on või ei ole vastandumist samamoodi nagu on või ei ole vastandumist maailmal ja tema mõnel teisel atribuudil, nt mateerial ja tema liikumisel.

Mida me saame sellest, et tunnistame korra mateeria atribuudiks?

Esiteks, see on kooskõlas meie teadmistega mateeriast. Me ei tunne mateeriat, milles puuduks kasvõi kõige primitiivsem kord. Ainuüksi meile tuntud mateeria organiseerumine ühesuguste elementaarosakeste liikidesse räägib korra olemasolust, mis oli olemas juba esimestel minutitel pärast meie universumi alguses olnud singulaarsust.

Teiseks, arusaamine, et struktuur, liik, idee, vorm, seadus, paratamatus, informatsioon, kujutis on ühe ja sama kategooria [– korra, struktuursuse] avaldumisviisid, annab (kui see on õige) meile samad eelised, nagu seda annab arusaamine, et soojus, mehaaniline liikumine ja bioloogiline kasvamine on üldise liikumise avaldumisviisid.

Kolmandaks, kord on möödapääsmatu lüli kategooriate ahelas mateeria – kord – mittehomoogeensus – vastasmõju – toime – liikumine.

Homogeenne mateeria on abstraktsioon, mis vastab Hegeli puhtale olemisele, mis on iseenesega samane ja ei sisalda erisusi ei eneses ega temast väljaspool oleva suhtes... See on tühi abstraktsioon, sest niisugust mateeriat nagu ka mateeriat ilma liikumiseta, pole kunagi olemas olnud. Mittehomoogeensus ja liikumine on seotud – kui universumit täidaks homogeenne mateeria, siis poleks liikuda millelgi.

Paljud arvavad, et mõte, ideaalne, ei ole ei aju ehitus ega tema seisund, vaid tekitatakse tema poolt. ... Selliste mõtlejate seisukohal on üks puudus – neilt ei ole võimalik

saada mõistlikku vastust küsimusele: millisel viisil küll tekitatakse see ideaalne, mida tegelikult tähendab termin “tekitamine”?

... mõtlemine, ideaalne, inimhing – need on aju liikumise kord või korra liikumine ajus – kuidas teile rohkem meeldib – kuid ideaalse tähendus on selles, et kord ajus ei ole tema enese kord.

[Seda Suhharevi mõtet võib selgemalt väljendada nii: aju enese korra kohane liikumine ise ei ole veel ideaalne nähtus. See on materiaalne nähtus, mis *on võimeline kandma* ideaalseid nähtusi. Ta saab kanda ajuvälise liikumise korda. Viimane *moduleerib* aju liikumise korda, aju *kodeerib* ta enese liikumise korrasse. Selline aju korra modulatsioonina eksisteeriv välismaailma kord on *informatsioon* (semantiliselt tähenduses). Seda korda suudab aju hoida mälus, sealt välja lugeda, interpreteerida ja laiendada.]

Objekti peegeldus²⁴ arvutis (näiteks mingis automaatses teadusaparaadis või robotis) on lihtsalt väliste asjade korra ülekandumine sisemistele kordadele. Meeldejätmiseks kasutatakse enamasti olekuid, kuid mõnikord ka asju; tänapäevastes masinates kasutatakse laialt sellist liiki mälu, millesse biti sissekandmine tähendab mingi elektronide koguse “panemist” isoleerivasse taskusse, mälu lugemine tähendab järele vaatamist, kas need elektronid, mis “meelespidamiseks” pandi, seal on. Korra alalhoidmiseks pole üldse tähtis, milles ta on väljendatud – kas liikumistes, asjades, olekutes. See küll loob mulje tema mittemateriaalsusest, aga eksisteerida, liikuda, vastasmõjustuda, üle kanduda saab ta vaid kui materiaalne kord.”

Niisiis argumenteerib Suhharev, et *ideaalne on materiaalses ajus toimuva oma-(ehk kande-)liikumise modulatsioon välismaailma struktuursuse poolt*.

²⁴ Meenutame, et *peegeldus* on nimetus, millega nt dialektilises materialismis tähistatakse inimaju viisi omada informatsiooni välismaailmast.

Aga kes (või mis) on see interpreet, kes tõlgendab seda struktuursust? Ja kuidas saaks ta seda teha? Talle on küll struktuursuse ajusse kand(u)misega töö tehtud lihtsamaks/võimalikuks, aga milles seisneb *arusaamine* semantilises mõttes?

Selle kohta võime pakkuda järgmise mudelhüpoteesi.

Ajus juba enne järjekordse info töötlemist olemas olev, olendi elu jooksul juba omandatud ja mällu salvestatud ning sealt välja kutsutav ja tegutsema rakendatav *informatsioon* (füsioloogilisi protsesse moduleeriv struktuursus) võiks olla see “keegi”, mis on selleks võimeline. Kõigepealt peab ta mälus oleva uue struktuursuse piiritlema (eristama mälusse üle kantud uuest struktuursusest tervikliku osa). Seejärel tuleb asuda selle osa töötlemisele – teatava “algoritmi” või “eeskirja” (struktuursuse, mida hoitakse mälus) järgi tuleb mälus olev uus struktuursus jagada elementideks (mälukujundeiks). Neid kujundeid peab võrdlema olemasolevate “näidistega” ja *ära tundma* vastavused mingite “teadaolevate tähendustega” (mis on samuti ajus esindatud *informatsiooni* ehk *välismaailmast üle kandunud struktuursuste* kujul).

“Arusaamine” peaks siis tähendama ajus oleva *informatsiooni võimet juhtidaaju tegevust* nii, et välismaailmast üle kandunud uues struktuursuses *tuntakse ära tuttavaid objekte, omadusi, seoseid*,²⁵ muutes selle ajus juba olemasolevatele otsusi vastuvõtvatele kõrgema taseme struktuursustele (mida võiks hästi arenenud elusolendite juhul nimetada psüühikaks) käsitatavaks. Samas tagatakse kõrgelt arenenud psüühikaga olendites ka sellise tegevuse enese mälusse protokollimine ning psüühika operatiivne juurdepääs sellele protokollile ehk – kasutades Margus Oti (vt lk 110) terminit – “läbivaatus” ka aju enese tegevusest.

Tehisintellekti arendamine võiks näidata, milles on sellise ettekujutuse puudujäägid informatsioonist *arusaamise* protsessi kohta.

²⁵ Sellises tähenduses on *arusaamine* rakendatav mõiste *elussüsteem* laia määratluse korral – näiteks bakter võib aru saada söögi või molekul teise molekuli lähedalolekust.

Peatükk 5

Organiseeritus ja kommunikatsioon

5.1 Organiseeritus

Tihti öeldakse, et elussüsteemid erinevad elutuist oma *kõrge korrapära* või *korrastatuse* poolest. See väljend pole õige – suure geomeetrilise (kuid staatilise) korrapäraga ehk korrastatud süsteemideks on näiteks kristallid, mida aga elusaiks ei peeta.

Elussüsteemide kohta tuleks öelda, et neil on kõrge *organiseeritus*¹. Siin me määratleme organiseeritust kui hulgast komponentidest koosnevate süsteemide mingil eriomasel viisil korrastatud funktsioneerimist.

Elussüsteemi organiseeritus on teisiti öeldes tema *funktsioneeriv struktuursus*. Üritame selgusele jõuda selle väljendi tähenduses.

5.1.1 Elusolend

Organiseerituse kohta elussüsteemides on võimalik saada teadmisi näiteks filosoofia vahenditega. Alustuseks on kasulik jälgida, kuidas kirjeldab erinevust elusa (siin nimetusega “olend”) ja elutu vahel noor eesti filosoof Margus Ott [18]:

¹ Kasutame siin selguse mõttes sõna *organiseeritus*, sest sellega sama tähendust omaval sõnal *organisatsioon* on veel mõned veidi erinevad tähendused, mis võiks põhjustada arusaamatusi.

“... mingisugust olendlikkust näime omistavat ka tuulele, merele ja muule sellisele ehk me “isikustame” neid. Kuid vähemasti tänapäeval ja harilikus keelepruugis nimetame tuule, mere ja muu sellise kohta “mis”. Ja tundub tõepoolest, et hundi ja tuule tegutsemine on erinevat laadi. Milles see erinevus õieti seisneb?

Üks erinevus, mis silma torkab, on see, et tuule puhul ei ole sellist tegutsemise “võimet” nagu me hundi puhul rääkisime: ei saa olla nii, et tuul hoiaks ühel hetkel oma tegutsemist vaos ning siis järgmisel hetkel vallandaks selle. St. tuul või meri on üleni käesolevas, samas kui hundil näib olevat veel mingi tegutsemisvõime, mis ei pruugi alati avalduda käesolevas tegutsemises. Tuul on see õhuosakeste liikumine, mis ta parasjagu on, äramääratuna õhurõhkude vahest ja muudest asjaoludest². (Neid asjaolusid on muidugi erakordselt palju.) Tuul ei “hoia ennast tagasi” vaid teostab end alati täielikult, on üleni see, mis ta käesolevalt on (teatava kiiruse ja kvaliteediga õhuosakeste liikumine).

Hunt aga saab ennast tagasi hoida, näiteks varitsedes või puhates. See tähendab seda, et hunt arvestab oma tegutsemises teatava ajalise ja ruumilise ulatusega³. Näiteks saagile lähenedes võtab ta arvesse enda ja saagi vahelist maastikku, tuule suunda jm. ruumilisi asjaolusid nagu ka teiste huntide tegevust – mis kõik ühtekokku moodustavad teatava iseloomuliku terviku, olukorra spetsiifilise “tähenduse”, mis ütleb hundile, kuidas ta peaks järgmiseks käituma. Ning saagi jahtimine eeldab ka mitme ajalise faasi koordineerimist: otsimine, varitsemine, kallaletun-

² Tuult saab matemaatiliselt kirjeldada atmosfääri kui *dünaamilise süsteemi* olekuvõrrandite (mis kujutavad endast keerulisi ja raskesti lahendatavaid osatulevistega diferentsiaalvõrrandeid) lahendite abil. Neile diferentsiaalvõrranditele, mis sisaldavad ka osatuletisi aja järgi, on (ajalise tuletise sisaldamise tõttu) omane ka süsteemi infinitesimaalse lähimineviku arvestamine. (*Märkus konspekti autoreilt.*)

³ Hundil on pikaajaline *mälu*, millesse on akumulieeritud nii päritud kui ka elu jooksul omandatud kogemus. Ta on võimeline *töötlema jooksva situatsiooni informatsiooni koos mälust võetavaga ning võtma vastu otsuseid*. (*Märkus konspekti autoreilt.*)

gimine, rävamine jne. Mitmesugused asjaolud ümbruses ei mõjuta hundi tegutsemist üksikseigana, vaid nad muudavad kogu olukorra tervikut, selle olukorra tähendust. Ning ka tema tegutsemise üksikud faasid omandavad mõtte alles tegutsemise tervikus. Niisiis hundi tegutsemise erinevad ajalised ja ruumilised seigad läbistavad üksteist, tema maailmasse pöördumine ja endast eristumine on ühte lõimitud, “läbi vaadatud”.



Joonis 5.1. Hundid. Foto: Vladkiselev, Venemaa. Vt lk 158.

Aga kui me võtame nüüd näiteks elus hundi, kes magab, ja äsja surnud hundi, siis milles nende vahe seisneb? Elus hunt on “kes”, aga surnud hunt peaks eluta olendina olema “mis”. Välisel vaatllemisel võivad nad väga sarnased olla ja vahe ei pruugi alati kohe märgatav olla. Anatoomiliselt on nad ühesugused, neil on samasugused kehaosad. Füsioloogiliselt on muidugi vahe suur: surnud hunt ei hinga, ta süda ei löö, veri ei ringle, närvisüsteemis ei liigu signaalid jne. Nii et lühikesel ja pealiskaudsel vaatlusel võib elus loom olla äravahetamiseni sarnane surnud loomaga, aga mida pikemat aega me neid vaatleme, seda selgemaks muutuvad erinevused ja me näeme, et surnud hundi keha laguneb koost, samas kui elus hundi keha püsib enam-vähem ühesugusena edasi. Mõlemates kehaosades toimuvad muutused ja eristumised, aga elusa hundi kehas on need koordineeritud, ühte lõimitud, nende tähendused on üksteisest läbi põimunud, nii et hundi keha üha taasloob ennast.

Nii et kui me enne ütlesime, et olendit iseloomustab teatav tegutsemise ühtsus, ühtelõimitus, siis nüüd võib veel lisada, et teda iseloomustab ka teatava kehakuju hoidmine.

Kuid ka näiteks kivi kuju püsib samasugusena. Ometi tundub, et kivi kehand ja hundi keha püsivad väga erineval moel, ning kivi kohta me ütleme tavakeeles jällegi “mis”, mitte “kes”. Kui me enne eristasime hundi tegutsemist tuule ja mere omast, siis nüüd tuleb eristada hundi keha kivi omast.

Kui lüüa kivi küljest kild, siis püsib ta edasi täpselt sellise lohuga nagu temasse jäi, ning ajapikku võib see lohk ainult suuremaks kuluda. Kivi ei taasta löögieelset olukorda. Kristall võib küll lohu kinni kasvatada, ent kristalli kasvamisel pole äramääratud piiri, nii et kui ümbruses jätkub materjali, siis ta mitte ainult ei kasvata lohku kinni, vaid kasvab igast küljest veel edasigi.

Seevastu kui kriimustada hunti, siis (1) tekkinud haav kasvab kinni ja (2) ainult see haav – erinevalt kivist, mis ei kasvata end kinni, ja kristallist, mis kasvatab end rohkem. Seetõttu tundub, et kivi võib püsida oma kujuga või kristall võib taastada oma kuju, ent mõlemad on oma tervikkuju suhtes üksikõiksed: kivi võib olla sälguga või ilma, kristall võib olla suurem või väiksem. Seevastu täiskasvanud hunt püüab aktiivselt säilitada just seda kuju, mis tal on, nii et väikesed vigastused paranevad ja ta taastab oma esialgse vormi.

...

Ühesõnaga, elusolendit ei iseloomusta ainult kehakuju püsimine, vaid ka selle taastamispüüd kõrvalekallete puhul.⁴ Ta on aktiivselt oma kujust huvitatud ja ta hoiab seda, erinevalt eluta olendist, mis on oma tervikkuju suhtes üksikõikne.

⁴ Siin kõneleb M. Ott *püsivusest* ehk *stabiilsusest* nii, nagu seda mõistetakse ka süsteemiteoorias. (*Märkus konsekti autoreilt.*)

Mida see “huvi” tähendab? See tähendab, et elus hunt on hunt igas oma kehaosas ja kõik tema kehalised muutumisprotsessid kokku moodustavadki hundi. Kõigil tema kehaosadel, muutumistel, eristumistel on üksteisega pistmist: ühe osa mõju ei piirdu tema ruumiliste piiridega, vaid ulatub üle kogu keha. Seevastu surnud hundi kehaosad ja protsessid on lihtsalt üksteise kõrval ja piirduvad iseenestega; ta pole enam üks terviklik olend, vaid väiksemate elementide (rakkude, molekulide, aatomite) kuhi. Anatoomiline vaatlus ei pruugi seda erinevust kohe tuvastada. Füsioloogia ütleb juba rohkem, ja vahe on siin, nagu öeldud, suurem, kuna füsioloogia väljendabki erinevate kehaosade läbikäimist üksteisega. Kuid ikkagi ei anna see veel täit pilti olendi kehast, sest erinevad füsioloogilised protsessid on küll mitut moodi kokku lõimitud, ent nad on ikkagi üksteise suhtes välised: üks ringlus transpordib hapnikku, teine saadab elektrilisi signaale, kolmas seedib jne. Olend aga ei pea eelistama ühtesid füsioloogilisi protsesse teistele ega järgnema kord-korralt nende kulgemistele, vaid ta on korraga kõik need protsessid. See tähendab, et olendi osad käivad üksteisega läbi veelgi radikaalsemas mõttes kui füsioloogia puhul.

...

Võiks öelda, et nad ei käi ainult “üksteisega” läbi, vaid ka “üksteisest” läbi, “läbistavad üksteist”. See tähendab, et olendit tuleb käsitada instantsina, mis on korraga kõigis oma kehaosades ehk nii-öelda “läbivaatab” neid ehk on neis korraga kohal. Seetõttu kui ma näiteks ennast liigutan, siis ei pea ma rändama ühest kehaosast teise, vaid keha on tervenisti, tervikuna minu jaoks olemas, või õigemini, ma ise olengi oma keha. Kui ma liigutan kätt, siis ei ilmne see minu jaoks nii, et üks minu osa (näiteks aju) liigutaks teist osa (kätt), vaid see ilmneb kehaterviku teatava nüansimuutusena, globaalse teisendusena.

...

Nüüsiis me nägime, et nii tegutsemise kui ka keha puhul

saab olendit uurida kahest küljest: ühest küljest tegevus-elementide või kehaosade aegruumilise kogumina ning teisest küljest selle kogumi elementide läbistuvuse ehk “läbivaatusena”. “Läbivaatuse” mõistega tahan ma osutada sellele, et olend on läbivalt kohal kõigis oma tegutsemise aspektides ja kehaosades korraga ehk ... ta hoiab neid justkui korraga “pilgus”. “

Niisiis – elussüsteem püsib elus tema (tohutusuure hulga ajaliste, ruumiliste jt) struktuuride ühe tervikuna koosfunktsioneerimise tõttu. Sellist organiseeritust võime nimetada tema *funktsioneerivaks struktuursuseks*. Süsteemi omaduste (matemaatika keeles – parameetrite) ja muutujate väärtused ei ole sellise koosfunktsioneerimise olukorras vabad suvaliselt muutuma, vaid süsteem sunnib neid muutuma (või olema konstantsed) nii, et koosfunktsioneerimine oleks tagatud. See tähendab, et elusas süsteemis on võimalike olekute arv piiratud nendeni, mis on kooskõlalised ja tagavad elusoleku. Elusad olekud moodustavad sellise süsteemi olekuruumis *kitsa piirkonna*, mille asukoha määrab suur hulk korraga kehtivaid kitsendusi – elusoleku tingimusi.

Surma järel langevad need kitsendused süsteemi olekutelt ära – võimalike olekute piirkond hakkab nihkuma ja laienema. Sellele vastavalt (vt valemeid (2.1.2.1, 2.1.3.1)) hakkab ka süsteemi entroopia kasvama. Elus organism (hunt) hoiab oma entroopia väikesema, kui see oleks sama organismi laibal (surnud hundil). Ja mida kaugemale surmaga kaasnevad muutused arenevad, seda enam kasvab tema entroopia.

Kokkuvõtvalt: elus süsteem *hoiab ära oma entroopia kasvamist* (oma siirdumist eluta ainele iseloomuliku tõenäoliseima oleku poole). Kõnealune tõsiasi on nii spetsiifiline, et seda võidakse kasutada ka elu defineerimisel ühe tunnusena. Seda tunnust võib näha elusmaailma mitmesuguste tasemete objektidel, mitte ainult bakteritest loomadeni, vaid ka biomolekulidest poliitiliste organisatsioonideni. Samuti võib sellelaadseid omadusi näha organisatsiooni madalamatel tasemetel, näiteks keemiliste elementide aatomite juures.

5.1.2 Elussüsteemide stabiilsusest

Enam-vähem sama saab väljendada ka formaliseeritumalt. Selleks, et (elutu või elus) süsteem või struktuur saaks kestvalt eksisteerida, peab ta olema *püsiv ehk stabiilne* (vt lk 69). Elussüsteemid on termodünaamiliselt tugevasti mittetasakaalulised süsteemid, mis elavad (st funktsioneerivad) koos teiste, nendega samal või erineval organiseerituse tasemel olevate naabritega (teised isendid, teised liigid; elatud süsteemid jm), tarbides ühist keskkonda (või vähemalt asudes samas keskkonnas) ja kujundades seda ühiselt. Kestva eksistentsi tagab elussüsteemidele seetõttu nii nende eneste kui ka nendega vastasmõjus oleva keskkonna stabiilsus. Stabiilsus tähendab elussüsteemi kohta, et püsiv süsteem ei tohi väljuda teatud eelistatud olekute piirkonnast. Selline eelistamine võiks olla ka väga primitiivne. Elussüsteem võib enese püsivust tagada

1) nii süsteemi tarvilike omadustega (mis oleksid samalaadsed nagu näiteks tehnikas ehitatud stabiilsetel seadmetel, aga see teeb võimatuks mingi hulga vabadusi; mehaaniliselt üsna püsiva elusolendi näiteks võiks võtta kilpkonna)

kui ka – ja nimelt see on tüüpiline elussüsteemidele –

2) oma käitumisega: süsteemi omadused on küll sellised, et mittepüsivus on võimalik, aga süsteem hoidub *juhtimise* abil sattumast ohtlikesse mittestabiilsuse piirkondadesse oma olekuruumis (näiteks võiks olla varblane).

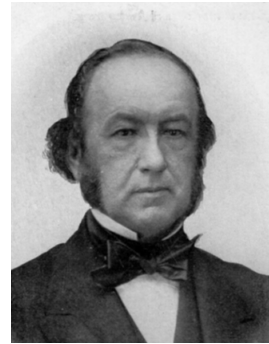
Elussüsteemid on tundlikud *väliskeskkonna* ja oma *sisekeskkonna* parameetrite suhtes. Nagu eespool märgitud, saavad nad eksisteerida vaid nende keskkondade parameetrite teatud väärtuste piires. Väliskeskkonnaga kohastumise üks viis on ebasobiva keskkonnaga piirkonnast äraliikumine – see on lihtsaim viis, mida kasutavad nii lihtsaimad elusorganismid kui ka mingil määral taimedki, ning loomad ja inimene. Teine on keskkonna muutuste eest varjumine ja varjete ehitamine. Sellist reaktsiooni keskkonna muutlikkusele näeme inimese ja loomade juures, kes enesele pesa ehitavad, s.t oma lähiümbruses keskkonda muudavad. Edasi võime eristada väliskeskkonna ulatuslikku ümberkujundamist. Tänapäeval on selleks enim võimeline inimene.

Oma sisekeskkonna reguleerimine (juhtimine) on omane kõigi tasemetel elusorganismidele. See seisneb enamasti sisekeskkonna *stabilisee-*

rimises.⁵ Füsioloogias nimetatakse sellist nähtust organismi *homöostaasiks*.⁶ Homöostaasi (kr k *ομοιος* – sarnane, *στασεις* – seisab paigal) kontseptsioon on esitatud prantsuse füsioloogi Claude Bernard'i (joonis 5.2) töödes 1850.–70. aastatel ja kinnistunud füsioloogias 1920. aastatel.

Elussüsteemil, erinevalt eluta süsteemist, on ülalõeldust tulenevalt olemas *vajadused*, mille rahuldamata jäämist võime pidada talle *kahjulikuks* ja rahuldamist *kasulikuks*. Teadvusega elussüsteemide jaoks tulenevad siit *hea* ja *halva* mõisted. Kõik need mõisted on subjektiivsed (mis ühele on kasulik/hea, võib teisele olla kahjulik/halb) ja kontekstist sõltuvad (mingi asi on ühes olukorras kasulik/hea, teises olukorras kahjulik/halb).

Keskkonna ja elusmaailma (mis on omavahel läbi põimunud, nii et nende eristamine on tihtilugu tinglik) *evolutsiooni*⁷ käigus püsima jäämiseks on üheks võimaluseks individuaalse, liigi- või muu struktuuriüksuse stabiilsuse suurendamine. Võib nähtavasti väita, et alates elussüsteemide tekkest kuni elusmaailma arengu mingi tasemeni on üldise entroopia kasvatamise tingimustes entroopiat kiiremini kasvatavad elussüsteemid



Claude Bernard
1813–1878, Prantsusmaa

Joonis 5.2.

⁵ *Stabiliseerimine* on lihtsamate juhtimisviiside hulka kuuluv juhtimistegevus (vt lk 135), mille eesmärk on süsteemi mingite väljundite (organismis – sisekeskkonna parameetrite) hoidmine etteantud väärtuste vahemikus.

⁶ Vt [37], *Internetis aadressil*: <http://en.wikipedia.org/wiki/Homeostasis>

⁷ *Evolutsioon* on fundamentaalne arenguprotsess looduses, millekohase teooria – *evolutsiooniteooria* – seisukohtadega on lugeja loodetavasti tarvilikul määral tuttav. Selles konsektis seda ei käsitleta. Elementaarseid sellekohaseid bioloogiateaduse kontseptsioone soovitame meelde tuletada nt õpikust [24]. Klassikalise (Darwini) evolutsiooniõpetuse idee on, et olemasolev elussüsteemide keeruline struktuursus on tekkinud maailma/universumi ajaloo jooksul lihtsamate struktuuride keerulisemateks muutumise protsessis, mille juures olulised mõjurid on konkurents eluks vajalike ressursside pärast, nende struktuuride uutes põlvkondades eelmiseist “lahendustest” kõrvalekalduvate juhulik tekkimine ja igas põlvkonnas toimiv looduslik selektsioon, mis eemaldab olemasolevate tingimustega mitte toime tuleva struktuuriga süsteemid.

reeglina välja tõrjunud seda neist aeglasemalt tegevad, sest entroopia kasvatamine lokaalse negentroopia tekitamise teel on ressursimahukas tegevus ja ressursse jätkub eelkõige kiirematele. Entroopiat aeglaselt kasvatavate (näiteks taimed) ja kiiresti kasvatavate (näiteks imetajad) elussüsteemide kõrvuti elamine on võimalik sedavõrd, kuivõrd need elussüsteemid kasutavad mitteühtivaid spetsiifilisi ressursse.

Teadvusega elussüsteemide (nt inimkond Maal) kohta tahame uskuda (vt ka lk 60), et nende kaudu lisandub nimetatud lihtsale evolutsioonilise stabiilsuse saavutamise mehhanismile uuel tasemel mehhanism, milles suudetakse ära kasutada teadvus kogu elusfääri prognoosi ja juhtimise vahendina.

5.1.3 Organiseerituse hindamisest

Eluteadustes püütakse organiseerituse mõistet formaliseerida, sidudes seda süsteemi *keerulisusega* (keerukusega, ingl k *complexity*, lad k *com* – koos, *plectere* – põimima) [36].⁸

Keerulisus mõistena on ka ise keeruline. Seda jagatakse *organiseerimata keerulisuseks*, mille puhul keerulisus tekib süsteemi osade tohutu paljususe tõttu ja on seetõttu raskesti jälgitav, sest osadega toimuvad protsessid on küll lihtsad, aga korreleerimata (neid võib modelleerida juhuslikega) – näiteks sobib ideaalne gaas. Teine keerulisuse nime kandev nähtus on *organiseeritud keerulisus*, mis kujuneb välja süsteemi osade mittejuhuslike vastasmõjude korral nende korreleeritud liikumise (muutumise) kujul. Siin võib süsteemi keerukuse kasvamine toimuda kui *emergentne nähtus* (vt lk 69) ilma välise juhtimiseta ja väljendub süsteemi emergeerunud osade omaduste mitmekesisuses ja liikumise kvalitatiivselt uute vabadusastmete tekkes. Wikipediast [36] võib lugeda, et keerulisel *adaptiivsel*⁹ süsteemil (miliste hulka kuuluvad ka elussüsteemid) on:

- palju osi (ja osade tüüpe) ning paljud neist on mittetriviaalseis vastasmõjudes;
- süsteemil on *mälu* või ta sisaldab tagasisidet;

⁸ Vt Wikipediast <http://en.wikipedia.org/wiki/Complexity>

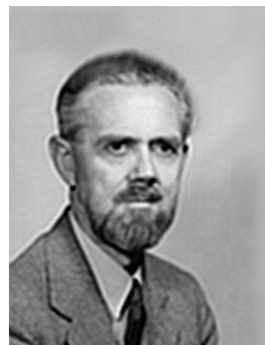
⁹ *Adaptiivseiks* nimetatakse juhtimisega süsteeme või juhtimissüsteeme, milles toimub *adaptiivjuhtimine* (vt lk 147).

- süsteemi ja keskkonna vastasmõjud on mittetriviaalsed või mitelineaarsed;
- keskkond on süsteemi [tugevasti] deformeerinud või on süsteem keskkonnale adapteerinud (kohastunud);
- süsteem on väga tundlik oma algoleku suhtes.

Loetletud omadused iseloomustavad ka elussüsteeme.

Keerulisuse mõõdu peaks siis elussüsteemide jaoks koostama selles loetelus toodud omaduste mingitest arvulistest hinnangutest. Kõige lihtsamaks keerulisuse mõõduks saab olla süsteemi vabadusastmete arv (s.o *olekumuutujate arv* ehk olekuruumi mõõtmelisis).

Sõltuvalt keerulisusest on erinevate elussüsteemide vajadused oma sise- ja väliskeskkonna omaduste järele 1) erineva mahuga ja 2) erineval keerukuse tasemel. Öeldakse, et neid vajadusi saab rahuldada vähem või rohkem *organiseeritud* süsteem.



William Ross Ashby
1903–1972, Suurbritannia

Joonis 5.3.

Lihtsam elussüsteem rahuldab oma vajadused suhteliselt passiivselt. Selle võimaldamiseks peab keskkond olema talle *soodne* ja vajadused vähesed. Muidugi on ka need süsteemid tegelikult aktiivsed. Nad liigutavad, liiguvad, kasvavad jne, kuid oma madalamast keerukusest tulenevalt vähemal määral kui keerulisemad elussüsteemid.

Kui keskkond muutub ebasoodsaks, siis peab elussüsteem oma vajaduste rahuldamiseks leidma uusi võimalusi – kohastuma; kui niisuguseid võimalusi ei leidu, siis hukkuma või välja surema. Kohastumine võib toimuda (evolutsioonilise tempoga) oma tegutsemist aktiivsemaks muutes. Selle käigus selekteeruvad välja enam kohastunud süsteemide liigid. Neil võib olla kõrgem organiseeritus, mis annab enam füüsikalisi ning bioloogilisi vabadusastmeid ehk – nende keerukus võib olla suurem. Samas on evolutsioon loonud ka suurearvulisi lihtsa, kuid “kindla konstruktsiooniga” elusolendite liike.

Vaatleme üht organiseerituse kvantitatiivse mõõdu defineerimise katset, mida kirjeldab oma monograafias [1] ukraina bioküberneetik Juri Antomonov. Organiseeritus seotakse selles süsteemi keerulisusega.

Süsteemi keerulisust hinnatakse siin inglise psühhiaatri ja küberneetika pioneeri William Ross Ashby (joonis 5.3) järgi süsteemi olekute arvu alusel, k_B -ga mastabeerimata Boltzmanni valemi (2.1.2.1) või teisiti öeldes, Hartley informatsioonivalemi (4.1.2.1) sarnase valemiga¹⁰

$$H_m = \log M, \quad (5.1.3.1)$$

kus H_m on süsteemi keerukus, M – selle süsteemi (lihtsuse mõttes diskreetsete) olekute arv. Viimase “arvutamises olev mõningane meelevaldsus kompenseeritakse selliste hinnangute teadliku piiramisega. Harilikult kasutatakse neid biosüsteemide omavaheliseks võrdlemiseks, mispuhul olekute arvu hindamiseks kasutatakse ühesugust meetodit¹¹” [1].

Olgu teada üksikute olekute tõenäosused p_i ($i = 1, 2, \dots, M$). Siis võib Shannoni valemi (4.1.2.9) (mis on ju k_B -ga mastabeerimata Gibbsi entroopiavalem) järgi leida sellise olekutesüsteemi *Shannoni entroopia*

$$H = - \sum_{i=1}^M p_i \cdot \log p_i. \quad (5.1.3.2)$$

Oleme juba varem märkinud (vt 2.1.3 lõppu), et H – statistilise jaotuse entroopia – on selle jaotusega esitatud juhusliku suuruse määramatuse mõõt. Siin on ta süsteemi oleku määramatuse mõõduks. Entroopia saavutab maksimaalse väärtuse, kui jaotus on ühtlane – kui siin süsteemi kõigi olekute tõenäosused on võrdsed. Siis saame kõigi p_i jaoks $p_i = 1/M$ ja

$$H = -M \cdot 1/M \cdot \log (1/M) = -\log (1/M) = \log M = H_m.$$

¹⁰ Kui juba mastabeeriva konstandiga korrutamises loobutakse, siis pole eriti tähtis ka logaritmfunksiooni aluse valik, sest seegi muudab vaid suuruse mastaapi ning ühesama aluse kasutamise korral jäävad suuruste omavahelised suhted – aga just neid kasutatakse analüüsil – ikka samaks.

¹¹ *Täiendus konspekti autoreilt.*

Samas on entroopia – määramatus – minimaalne, kui süsteem püsib ühes olekus, s.t kui leidub k -s olek nii, et $p_k = 1$. Sel juhul $H = -1 \cdot \log 1 = 0$. Kokkuvõttes – kehtivad võrratused

$$0 \leq H \leq H_m. \quad (5.1.3.3)$$

Mõõduks *organiseeritusele*, mida elussüsteem loob eneses (või oma tehiskeskkonnas), tuleb võtta suurus

$$\Theta \stackrel{\text{def}}{=} H_m - H, \quad (5.1.3.4)$$

kus H_m on hinnang objekti olekute jaotuse entroopia kohta maksimaalse määramatuse juures, H aga tema olekute jaotuse entroopia hinnang (sama hindamismeetodiga) objekti tegeliku olekutesüsteemi põhjal. Suurus Θ – *absoluutne* organiseeritus – näitab, kui palju on süsteemi entroopia vähenenud *organiseerituse tõttu*. See suurus ühtib põhimõtteliselt Brillouini negentroopiaga ja Shannoni informatsiooni. Seda tõsiasja võime sõnastada väitena

Elussüsteemi organiseeritus on tema struktuuris kehtunud negentroopia.

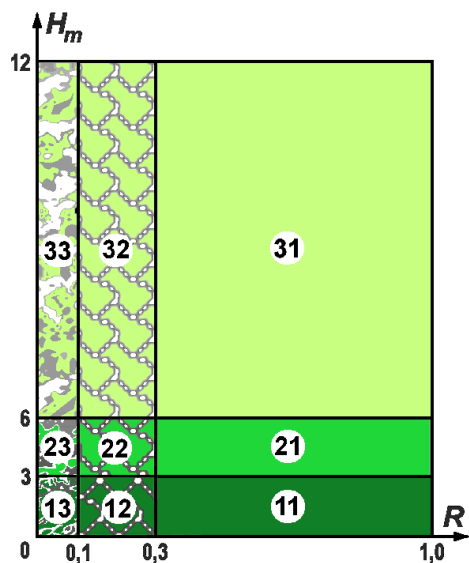
Süsteemi keerulisuse hindamise meetodist sõltumatu näitajana on otstarbekas kasutada *suhtelist organiseeritust* R :

$$R \stackrel{\text{def}}{=} \frac{\Theta}{H_m} = 1 - \frac{H}{H_m}. \quad (5.1.3.5)$$

Näitena organiseerituse mõiste sellise definitsiooni rakendamisest vaatleme bioloogiliste süsteemide kui matemaatilise modelleerimise objektide klassifitseerimist nende keerulisuse ja suhtelise organiseerituse alusel Antomonovi [1] poolt. Klassifitseerimiseks on kasutatud järgmisi skaalasid:

| | | | |
|---------------|-------------------|-----------------------|---------------------|
| lihtsad | $0 \leq H_m < 3,$ | determineeritud | $0,3 < R \leq 1,0,$ |
| keerulised | $3 \leq H_m < 6,$ | kvaasidetermineeritud | $0,1 < R \leq 0,3,$ |
| ülikeerulised | $6 \leq H_m,$ | stohhastilised | $0 < R \leq 0,1.$ |

Joonisel 5.4 on kujutatud nende skaalade alusel koostatud süsteemide klassifikatsioonidiagramm. Diagrammi autor on sidunud piirkondi diagrammil vastava elussüsteemi modelleerimiseks tarvilike matemaatiliste meetoditega. Lihtsate ja keeruliste determineeritud süsteemide (piirkonnad 11 ja 21) modelleerimiseks sobib automaatjuhtimisteooria matemaatiline aparaat, milles kasutatakse diferentsiaalvõrrandeid. Süsteemide jaoks piirkondadest 12 ja 22 tuleb kasutada mitte-lineaarseid diferentsiaalvõrrandeid, parameetrilisi võrrandeid ja võrrandeid, mille koefitsiendid on tuntud jaotustega juhuslikud suurused. Piirkondadesse 13 ja 23 sattuvate süsteemide korral tuleb rakendada automaatide teooriat, Markovi ahelaid, juhuslike protsesside teooriat. Väga keeruliste stohhastiliste biosüsteemide (piirkonnad 32 ja 33) jaoks, kirjutab autor, “on raske pakkuda midagi peale keerulisuse ja organiseerituse entroopiapõhiste hinnangute”.



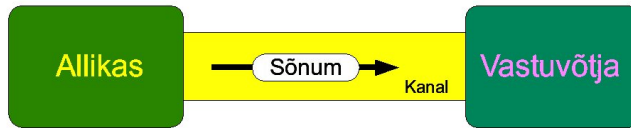
Joonis 5.4. Antomonovi klassifikatsioonidiagramm biosüsteemide jaoks [1].

5.2 Kommunikatsioon

Elussüsteemid kasutavad elamiseks, s.t oma termodünaamiliselt mit-tetasakaalulise oleku dünaamiliseks säilitamiseks ehk taasloomiseks informatsiooni. Kõige üldisem vastus küsimusele “Kust ja kuidas elus-süsteem informatsiooni saab?” on: suheldes ülejäänud maailmaga.

5.2.1 Kommunikatsiooni mudelid

Kommunikatsioon on üks elussüsteemide olulisemaid tegevusi. Väga üldisel tasemel saab suhtlemisena osal juhtudest lisaks teabevahetusele käsitleda ka aine vahetust. Ja seda mitte ainult kirjade ja postkaartide üksteisele saatmise mõttes.



Joonis 5.5. Suhtlemise baasmudel klassikalistes kommunikatsiooniteooriates. Teooriati varieeritakse sõnumi kodeerimisviise ja edastuskanali omadusi, aga ka *allika* ja/või *vastuvõtja* määratlusi.

Suhtlemise kohta on hulgaliselt erinevaid mudeleid. Joonisel 5.5 kujutatud klassikaline kommunikatsiooni baasmudel koosneb neljast komponendist:

- teabe **allikas**, kes või mis soovib edastada mingit teavet;
- sõnum** – s.o edastatava teabe füüsiliselt tajutav vorm (andmed);
- kanal** – s.o eriline keskkond, milles *sõnum* liikuda saab;
- teabe **vastuvõtja**, kes või mis saab sõnumit tõlgendades teada allika poolt sõnumisse kodeeritud teabe.

Sellel baasmudelil põhinevaid mudeleid on palju ning need erinevad omavahel sõnumi füüsilise olemuse, teabe kodeerimisviisi ja kanali omaduste poolest.

Sõnumi füüsiliseks olemuseks on hääle korral õhu rõhulainete muutumine ajas, kirjutatud teksti korral paberi valgust peegeldavate omaduste erinevus paberipinna erinevais kohtades, lauatelefoni korral voolutugevuse muutumine telefoniliinis, analoograadio korral raadiosignaali erinevus konstantse amplituudi ja sagedusega kande-signaalist, vinüülplaadil helivao profiili erinevus silindrilisest pinnast, magnetkaardil magnetdomeenide suuna vaheldumine piki inforada jne.

Teabe võimalikud kodeerimisviisid sõltuvad oluliselt sõnumi füüsilisest olemusest, kuid ka fikseeritud füüsikaliste protsesside kasutamisel saab seda kodeerida erineval viisil. Näiteks raadiosignaali korral saab informatsiooni kodeerida nii kandevsignaali amplituudi kui ka sageduse muutumisse.

Kanali omadustest võib erinevaid väärtusi omada nt kanali tundlikkus mitmesuguse päritoluga mürade suhtes. Mürad võivad põhjustada edastatavate sõnumite moonutumist teel allikast vastuvõtjani. Vastuvõtja võib moonutatud sõnumeid, kui need temani jõuavad¹², valesti mõista, mitte mõista või sõnumiks mitte pidada.

Keerukamates kommunikatsioonisüsteemides sisalduvad mitmesuguste omadustega vastamismehhanismid. Vastuvõtja informeerib sel juhul allikat sõnumite saabumisest ja neist arusaamise edukusest. Nii viisi saab oluliselt parandada teabe adekvaatse kohalejõudmise tõenäosust, sest tekib võimalus suhtluse käigus tekkivaid vigu ka parandada.

Selliseid allikas-sõnum-vastuvõtja-mudeleid on alates möödunud sajandi keskpaigast kasutatud tehniliste andmeedastus- ja salvestussüsteemide toimimise kirjeldamiseks, analüüsiks ning arendamiseks. Hiljem on hakatud sarnaseid mudeleid kasutama ka sotsiaalse kommunikatsiooni, reklaami ja muu mittetehnilise infoedastuse uurimiseks.

Kõigi nende kasutusvaldkondade ühisnimetajaks on olemasolev fikseeritud *protokoll*¹³ alusel toimiv kommunikatsioonikeskkond ning vajadus selles keskkonnas ühes kohas olemasolevat informatsiooni teises kohas kasutada. Just selline on olukord tehnilistes andmeedastussüsteemides. Sarnane on olukord ka osas sotsiaalsetest kontekstidest, kuid seda juba märgatavate mööndustega. Näiteks klassikalisel koolisituatsioonis on meil olemas kõik vajalikud komponendid, kuid seejuures kasutatava info kodeerimisviisi ja suhtlusprotokolli nüansside paremaks muutmine ei lõpe ilmselt kunagi.

¹² Üheks müra toime tulemiks võib olla sõnumite vastuvõtjani mittejõudmine – näiteks tänapäevased teatri- ja kontserdisaalid ehitatakse nii, et need rikuksid väljaspool olevatest saatjatest saalis olevate vastuvõtjateni kulgevaid raadiokanaleid, välistades nii viisi mobiiltelefonide helina ja piiksumistega saalis toimuva häirimise.

¹³ Nii infotehnoloogias kui ka diplomaatias nimetatakse erinevate osapoolte vahelise suhtlemise detailset reeglistikku *protokolliks*.

Elussüsteemi kommunikatsioonist ja informatsiooni olemusest paremini arusaamiseks piisab lihtsamast mudelist – mittehomogeensest (*suhtlus*)keskkonnast¹⁴ ning *suhtleja*st selles.

Suhtleja on siinses käsitluses keegi või miski, kes või mis suhtleb, s.t vahetab informatsiooni kellelegi või millegagi väljaspool iseenast. Joonisel 5.6 markeerib sellist suhtlejat inimpea sarnane objekt ning suhtlemise informatsiooni-vahetuse protsessi valgetest nooltest ring. Suhtleja vahetab teavet selles mõttes, et ammutab keskkonnast andmeid, interpreteerib ehk tõlgendab neid info saamiseks, töötleb saadud infot koos varem meeldejäetuga ja muudab siis omakorda keskkonda, kodeerides sinna omalt poolt informatsiooni.

Selline mudel on väga üldine, võimaldades lisaks toimivatele suhtlusskeemidele modelleerida ka uute suhtlusviiside teket ja arengut. See tuleneb asjaolust, et kommunikatsiooniprotsessi käivitumiseks pole vaja eelnevalt fikseeritud suhtluskeskkonda ja protokoll – kommunikatsioon on suhtleja olemise viis ja pidev protsess. Suhtleja lihtsalt reageerib keskkonnast saadavatele signaalidele.

Näiteks, märgates suvisel ajal õues olles taevaservale kerkinud tumedaid pilvi, võib inimene olenevalt oma varasematest kogemustest ja muudest asjaoludest reageerida väga mitmeti. Nimetame siinkohal mõned neist võimalustest:

- võib pilvesarnase moodustise paremaks uurimiseks puu otsa ronida, et selgitada, kas see ikka on äikesepilv või hoopis suuremast põlengust tõusev suits;



Joonis 5.6. Mittehomogeenne keskkond ja suhtleja selles. Joonisel on suhtleja markeeritud inimesena, kuid suhtlejatena võivad toimida ka oluliselt lihtsama struktuuriga süsteemid.

¹⁴ Kuna selliselt määratletud keskkond sisaldab eneses ka teisi suhtlejaid, siis tekib meil mitme suhtleja fookusesse võtmisel terminoloogiline probleem keskkonna mõistega. Sestap nimetame edaspidi mitme suhtleja ühist keskkonda vajadusel *päriskeskkonnaks*, jättes *keskkonna* tähistama kogu ühe suhtleja välist maailma.

- võib hakata liikuma äikese eest varju pakkuva koopa poole;
- võib hakata vihmavee kogumiseks ettevalmistusi tegema;
- võib kaasasoleva sõbra tähelepanu lihtsalt pilvele juhtida ning proovida ühises tegutsemises kokku leppida.

Kõik need reaktsioonid on meie üldistatud suhtlusmudeli mõttes suhtlemised. Klassikalist suhtlusmudelit saab aga kasutada vaid viimase variandi korral eeldusel, et osalistel leidub eelnevalt fikseeritud suhtlusprotokoll ja seda järgitakse. *Suhtleja-keskkond*-mudel aga ei vaja eelnevalt fikseeritud protokolle – mudel pigem aitab mõista, kuidas need tekivad ja evolutsiooniliselt kasutusele võetakse. Pilve viitamiseks ei pea ju teadma, kuidas äikesepilve mingis konkreetses keeles nimetatakse ja kas enne suu avamist tuleb vääritimõistmisest hoidumiseks püsti tõusta või mitte. Pilve taevavõlvil olemas olemine teeb sellest teavitamise lihtsaks – piisab lihtsalt käega sellele osutamisest.



Joonis 5.7. Näide suhtlejast, kes parasjagu aktiivselt keskkonda mõjutab.

Joonisel 5.7 kujutatud tegelase suhtlejaks klassifitseerimisel saavad küll tekkida emotsionaalsed tõrked, kuid formaalselt probleemi pole – tegemist on suhtlejaga, kes parajasti muudab keskkonda, kodeerides sinna Elisabethi ja Jakobi kohta käivat igavikulist teavet.

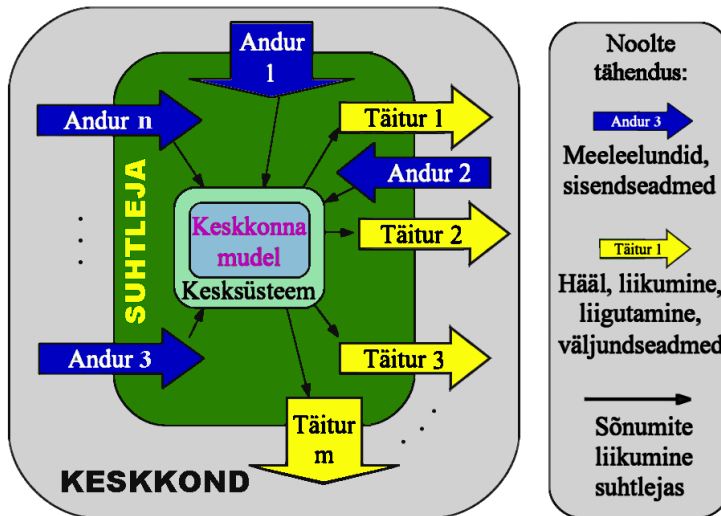
5.2.2 Suhtleja mudel

Vaatleme lähemalt äsjakirjeldatud suhtleja-keskkond-mudeli üht osapoolt – suhtlejat.

Suhtlemiseks peab suhtleja suutma keskkonnast andmeid saada ning olema võimeline keskkonda mõjutama. Selleks on suhtlejal kahe-suguseid perifeerseid süsteeme:

1. Andmete saamiseks kasutatavaid perifeerseid süsteeme nimetatakse olenevalt suhtleja tüübist erinevalt – meeleeelundeiks, *anduriteks*, retseptoriteks või ka sisendseadmeteks.

2. Keskkonna mõjutamiseks bioloogiliste suhtlejate poolt kasutatavatel perifeersetel süsteemidel – hääleaparaadil ja liikumis- ning liigutamismehhanismidel puudub hea üldnimetus. Tehniliste süsteemide korral nimetatakse neid *täituriteks* ja väljundseadmeteks.



Joonis 5.8. Suhtleja sisestruktuur. Paneme tähele, et suhtleja on enesearnane struktuur – tema andurid, täituriid ja keskne andmetöötlussüsteem peavad toimimiseks omavahel suhtlema, s.t on ka ise suhtlejad.

Lisaks anduriteks ja täituriteks markeeritud perifeersetele komponentidele on joonisel 5.8 kujutatud ka suhtleja sisestruktuuri kuuluv *keksüsteem*, mis vahetult opereerib suhtleja arusaamisega teda ümbritsevast keskkonnast – suhtleja *keskkonnamudeliga* ehk suhtleja *maailmapildiga* juba mõistetele vastavate abstraksioonide tasemel.

Et keskkonnas täiturite abil võimalikult vähese ressursikuluga¹⁵ soovikohaseid muudatusi teha, vajab kesksüsteem välismaailma võimalikult head mudelit.

Osa väliskeskonna muutmise soovidest on eriomaselt seotud suhtlejaks olemisega, s.t vajadusega omada adekvaatset maailmapilti. Need soovid ei sõltu suhtleja kellekski või millekski muuks olemisest. Tüüpiliselt on selline aktiivsus seotud õppimisega – kas siis mängimise, praktilise katse-eksituse teel õppimise või ka spetsiaalselt konstrueeritud õppeprotsessis osalemisega.

Siinkohal on sobiv meenutada huvitavat ja järelemõtlemist väärivat detaili seoses üldteada asjaoluga, et inimese kui suhtleja kesksüsteemiks on aju. Täiskasvanud inimese ajus on ca 10^{11} närvirakku, mis on omavahel seotud ca 10^{14} sünapsiks nimetatava seosega. Väidetavalt moodustub 80% sünapsidest esimese kolme eluaasta jooksul, mil inimene õpib siin maailmas elementaarselt toime tulema, sh kõndima ja rääkima. Kuna kolmes aastas kokku on veidi alla 10^8 sekundi, siis

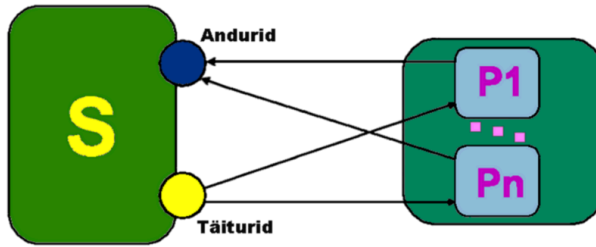
keskmine sünapside tekkimise kiirus inimese esimesel kolmel eluaastal on umbes 10^6 sünapsi sekundis (!).

Miljon uut seost igas sekundis ja seda kolm aastat järjest, põhiliselt katse-eksituse meetodil õppides – see inimeste maailmas elementaarse toimetulemise õppimine on raske töö!

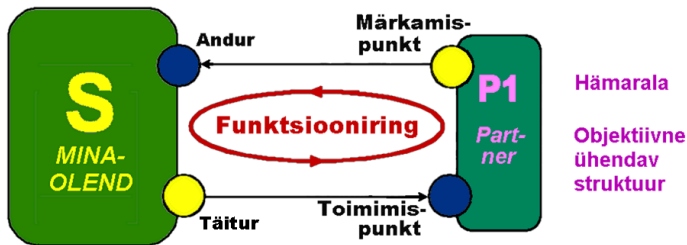
Tuleme tagasi suhtleja ja tema mudeli juurde. *Suhtleja-keskkond*-mudeli kasutamiseks konkreetses olukorras on otstarbekas ka keskkonda veidi lahti seletada. Joonisel 5.9 ongi seda kolmel viisil tehtud. Skeemil (a) on markeeritud situatsioon, kus suhtleja eristab keskkonnas mitut suhtluspartnerit¹⁶, skeemil (b) aga see, kuidas toimub suhtleja kommunikatsioon igaühega neist. Semiootikud – just need kasutavad joonisel 5.9 olevaid skeeme – nimetavad kõiki märkamispunkte, toimimispunkte ja funktsiooniringe (vt skeemi (b)), mis suhtleja jaoks keskkonnas eksisteerivad, selle suhtleja *omailmaks*. Eri-nevate suhtlejate omailmad erinevad üksteisest, sest erinevate suhtle-

¹⁵ Termodünaamikas on universaalseks ressursiks vabaenergia, aga konkreetsete täiturite kontekstis võib esineda ka muid kriitilisi ressursse.

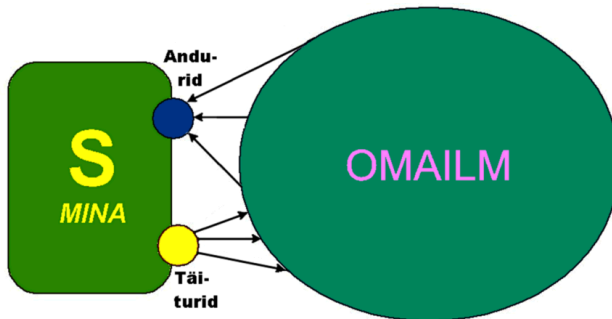
¹⁶ Suhtluspartnerid võivad seejuures oluliselt erineda nii suhtlejast kui üksteisest.



(a) – Suhtleja saab keskkonnast teavet oma *andurite* kaudu ja mõjutab keskkonda *täitureid* kasutades. Keskkonnas võivad eristuda eraldi suhtluspartneritena (P_1, \dots, P_n) käsitletavat alamstruktuuri.



(b) – Andurid saavad andmeid vaid eriomastest *märkamispunktidest* ning täiturid mõjutavad *toimimispunkte*. Semiootilises suhtlusmudelil nimetatakse suhtluspartneri märkamise ja temale toimimise vahelduvat järgnemist *funksiooniringiks*.



(c) – Suhtleja suhtleb vaid selle osaga keskkonnast, mis on tema anduritele ja täiturile kättesaadav. Mudelis nimetatakse seda suhtleja *omailmaks*.

Joonis 5.9. Erinevaid suhtlemise semiootilisi mudeleid.

jate märkamis- ja toimumisvõimekused on erinevad. Näiteks pimedas inimese omailmas ei ole valgust ega sellega seonduvat. Samas on pimedas omailmas hulgaliselt häälte ja kompimisega seonduvat, mis aitab tal ruumis ja olukorras orienteeruda ning mida nägijail pole. Koerte omailma aga täidavad suures osas lõhnad ja lõhnadega seonduv. Seal on oma koht ka ultrahelidel – 20 kHz-st kõrgema sagedusega rõhulainetel, mille olemasolust looduses teab inimene vaid teaduse ja tehnika vahendusel.

Kuid keskendudes uuesti suhtleja sisestruktuurile (vt uuesti joonist 5.8 lk 122) ja suhtleja sisestruktuursete komponentide vahelisele kommunikatsioonile, näeme, et see toimub klassikalise *allikas-sõnum-vastuvõtja*-mudeli järgi. Nii on võimalik, kuna suhtleja sisestruktuur ja protokollid, sh komponentidevahelised sidekanalid on enne suhtleja toimima hakkamist selleks valmis. On määratud, milliste füüsikaliskeemiliste protsesside baasil komponentidevaheline sõnumiedastus toimuda saab ja millised on nende protsesside füüsikalised piirangud.

Näiteks imetajate puhul toimivad andmeedastuskanaleina paralleelselt nii närvid kui ka vereringe. Väga jämedalt võib öelda, et närvirakud edastavad suhteliselt täpselt adresseeritud ja elektriimpulssidena kodeeritud sõnumeid. Vereringe kaudu edastatavad keemiliselt kodeeritud sõnumid käituvad aga sarnaselt raadiolainetega, mis küll jõuavad kõigini, kuid vastu võtavad sõnumeid vaid need, kelle vastuvõtja vastavale lainepikkusele häälestatud on. Imetaja vereringe korral ei häälestuta muidugi raadiolainete sagedustele, vaid *keemilistele protokollidele*.

Andmete liigutamist suhtleja kesksüsteemi ja perifeersete komponentide vahel saame käsitleda kesksüsteemi hallatavas maailmapildis põhiliselt¹⁷ eelnevalt olemasolevatest mõistetest ja nende vahelistest seostest koosnevate sõnumite edastusena andureilt kesksüsteemi ja kesksüsteemilt täituritesse.

Tuttavaid mõisteid ja nende vahelisi seoseid sisaldavate sõnumite vahetamine on omane ka suhtlejatevahelisele kommunikatsioonile. Erinevus on vaid informatsiooni andmetesse ja andmete füüsiliseks sõnu-

¹⁷ *Põhiliselt* selles mõttes, et paralleelselt nende tuntud mõistetega võib sõnumis esineda vähesel määral ka uusi, s.t suhtleja jaoks sõnumi saamisel veel tundmatuid mõisteid.

miks kodeerimise konkreetsetes viisides¹⁸.

Asjaolu, et mingi objekt või nähtus on sarnane oma osaga (nagu *matrjoška* on sarnane tema sees oleva veidi väiksema matrjoškaga), nimetatakse selle objekti või nähtuse *enesesarnasuseks*. Me täheldasime, et suhtleja kesksüsteem suhtleb andurite ja täituritega (enese)sarnaselt suhtleja kui terviku suhtlusega keskkonnaga – mõlemal mastaabisandil suhtlemisel kasutatakse selleks sõnumite vastuvõtmist ja väljasaatmist.

Matrjoškade korral leidub suurim matrjoška, mis ongi kõige välimine ja ka väikseim, mis tegelikult polegi enam matrjoška, sest ei sisalda enam enesesarnast.

Kuigi enesesarnaste süsteemidega on tõenäoliselt samuti, ei tea me aga seal kunagi, kas nähtuse meile teada olevalt väikseim esinemismastaap ikka on väikseim või me lihtsalt ei oska selle taseme matrjoškat avada, et sealt järgmine nähtavale ilmuks...

Looduses leidub hulgaliselt enesesarnaseid struktuure. Näiteks puuleht joonisel 5.11, lumehelbed või rannajoon. Matemaatikas – seal nimetatakse enesesarnasust *fraktaaluseks* ja fraktaalset struktuure *frak-*



Joonis 5.10. Matrjoškad näitena enesesarnase struktuuriga objektist.



Joonis 5.11. Fraktaalne puuleht.

¹⁸ Näiteks vestlevate inimeste puhul on sõnumiteks tuttavatest sõnadest koosnevad laused, kusjuures sõnadega tähistatud mõistete vahelised *seosed on grammatikast lähtuvalt kodeeritud sõnade asukohasse* lauses. Sõnad omakorda *esitatakse* aga hääle, st õhu rõhulainete kaudu.

*taliteks*¹⁹ – näidatakse, et fraktaalse joone pikkuse mõõtmise tulemus sõltub mõõtmisviisist. Mida täpsemat mõõtmistehnikat kasutatakse, seda suurem tulemus saadakse.

Selle väite mõistmiseks piisab katsest mõõta joonisel 5.11 kujutatud puulehe ümbermõõt. Kui puulehe või lumehelbe ümbermõõdu ja rannajoone pikkuse mõõtmisel tuvastatakse tulemuse pikenemine sedamööda, mida täpsemalt mõõdetakse, siis on see enamasti “huvitav tulemus”. Aga kuidas suhtuda sellesse, et kahe riigi ühine maismaapiir on eri poolte arvates oluliselt erineva pikkusega?²⁰

Suhtleja on olemuslikult enesesarnane – ühelt poolt sisaldab ta eneses *madalama üldistustaseme* suhtlejaid ning teiselt poolt on ise komponendiks *kõrgema üldistustaseme* suhtlejates. Eespool oli juttu inimese kui suhtleja kesksüsteemist, peaaugust, mis on üks inimese *sisesuhtlejatest*. Samas leidub hulgaliselt inimeseüleseid suhtlejaid, kelle sisesuhtlejaks inimene on. Sellisteks on perekonnad, leibkonnad, väiksemad asutused ja organisatsioonid ning suuremate struktuuriüksused. Kõik need kasutavad suhtlemiseks oma inimestest koosnevaid “*perifeerseadmeid*”. Sõnumitena aga liigutatakse lausutud ja/või kirja pandud lauseid ning allkirjastatud dokumente – paberil või digitaalseteid.

Tinglikult võime suhtlemisest rääkides kasutada inimmeeltel põhinevaid *metafoore*, nimetades igasugust sõnumite kokkupanemist ja väljasaatmist sõltumata protokollist ***rääkimiseks*** ja sõnumite vastuvõtmist ***kuulamiseks***. Sõnumite protokoll ja kasutatavat sõnastikku saame sel juhul nimetada (*suhtlus*-)***keeleks***.

Vähegi keerukama suhtleja suhtluspartnerid jagunevad rühmadesse, mille siseselt suhtlejad omavahelises kommunikatsioonis kasutavad sellele rühmale eriomast *keelt*. Isegi patsiendi ravist rääkides kasutavad

¹⁹ Fraktalite eestikeelse matemaatilise käsitluse võib leida *Kaoseraamatust* [13].

²⁰ *Kaoseraamatu* [13] andmetel on näiteks Hollandi piiri pikkus Belgiaga 380 km, samas kui Belgia piiri pikkus Hollandiga on hoopis 449 km. Erinevus on 69 km!

arstid omavahel üht keelt²¹ ja patsiendiga teist keelt²². Aga enamik perearste peab lisaks oma ravialasele tegevusele veel suhtlema haigekassa, maksuameti ja pangaga. Loomulikult erinevad vastavad suhtlemise keeled nii omavahel kui eriti ravimisel kasutatavast keelest.

Sarnaselt arstiga suhtleb ka tema infosüsteem (kui selline olemas on²³), oma erinevaisesse rühmadesse kuuluvate partneritega erinevalt – nii registratuuriga, laboritega, teiste raviasutustega, haigekassa kui kohapealsete kasutajatega – iga sellise rühmaga suhtlemiseks on oma keel. Iga selline keel sisaldab hulka mõisteid koos nendevaheliste seostega ning sõnumite kokkupanemise ja analüüsi reegleid. Need erinevates partnerirühmades kasutatavad keeled on erialased, eriolukorras kasutatavad, muudest keeltest vähem või rohkem erinevad ehk lihtsalt *erikeeled*.

Nii nagu inimkeeledki, saavad meie mudelsuhtleja poolt kasutatavad erikeeled välja kujuneda vaid tegeliku suhtlemise käigus.

5.2.3 Mõisted ja mõistemudelid

Leidsime, et elussüsteemid kui suhtlejad on enesesarnase struktuuriga ja nad kasutavad omavaheliseks suhtluseks mitmesuguseid keeli. Iga keele oluliseks komponendiks on *sõnavara*.

Kasutame järgnevas küll kõnepõhise suhtlemise terminoloogiat, aga peame silmas, et selle rakendusväli võib tegelikult olla laiem. Näiteks sõna “sõnavara” võib siin sõnadekogumi asemel tähendada koodisüsteemi või hoopis eriomadustega keemilisi ühendeid, näiteks DNA-d moodustavaid aminohappeid.

Mõisted on abstraktsioonid, mis vastavad teatud ühesuguse omaduste komplektiga konkreetseile reaalse maailma objektidele või nähtustele.

²¹ Seda keelt on nad aastaid ülikoolis õppinud ja selle tundmise kohta on neil diplom, ilma milleta nad ei saakski arstina tegutseda.

²² Enamasti on selleks lapsena omandatud emakeel – ideaalis patsiendiga ühine.

²³ Enamik seniseid arvutitel põhinevaid tugisüsteeme, mida meditsiinis tänapäeval kasutatakse, on siiski pigem andmetöötlussüsteemid kui infosüsteemid. Seda nende sõnade infotehnoloogia terministandardi EVS-ISO/IEC 2382-1 “Infotehnoloogia põhitervimid” kohases tähenduses.

Sõnad aga on mõistete, reaalsete objektide ja nähtuste nimetused.

Kõik see puudutab suhtlejat (seega ka elusaid süsteeme) kuna suhtleja kesksüsteem saab oma andureilt signaale vaid andurite tajutud keskkonnaomaduste kohta. Seega peab kesksüsteem oma maailmapildi kokku panema vaid neid tajutavaid keskkonnaomadusi kasutades. Paljude anduritega vähegi keerukam suhtleja hakkab samaaegselt ja ühes rütmis muutuvaid erinevaid andureilt saadud signaale rühmitama ja ühe, juba uue iseseisva tähendusega signaalina käsitlema²⁴. Selline toimimisviis on evolutsiooniliselt eelistatud, kuna nii toimivad isendid kasutavad kesksüsteemi ressursi säästlikumalt kui teised ja saavad seetõttu olude muutumistele kiiremini ja paindlikumalt reageerida. Paneme tähele, et selline ühesuguste omaduste komplektid on ju vastavalt definitsioonile mõisted.

Mõisted on seega suhtleja maailmamudeli loomulikud komponendid. Mõistete süsteemi, mis on seesmiselt küllaldaselt kooskõlaline ja mingile hulgale suhtlejaile konsensuslikult ühine – mingi hulk suhtlejaid kasutab seda omavaheliseks spetsiifiliseks suhtlemiseks – nimetame (vastava valdkonna) *mõistemudeliks*²⁵. Seejuures need hulgad – ühelt poolt kokkuleppijad ja teiselt poolt kasutajad – võivad, kuid ei pea tingimata kokku langema. Näiteks *matemaatika mõistemudeli* (tavapäraselt öeldes – matemaatika; abstraktse distsipliinina on matemaatika ühtlasi iseenese mõistemudeliks) koostajaid on võrreldes selle kasutajatega väga vähe.

Selleks, et mingit mõistemudelit suhtluses kasutada, peab see mudel eelnevalt suhtleja kesksüsteemis olevasse maailmamudelisse vähem või rohkem iseseisva alamosana integreeritud olema. Tavaliselt nimetatakse uue mõistemudeli oma kesksüsteemi integreerimist õppimiseks.

Matemaatikas välja töötatust saame mõistetega opereerimiseks ka-

²⁴ Selle väite üheks tõenduseks on näiteks vene akadeemik Pavlovi koertega tehtud tingitud refleksi katsed, kus koertele toitu andes alati süüdati ka lamp. Mõne aja möödudes aga täheldati, et koertel vallandusid toidu saamisele iseloomulikud füsioloogilised protsessid ka reaktsioonina ainult lambi süütamisele, ilma et seejuures oleks toitu antud. Tõlgendame seda kui toidu nägemise ning haistmise ja lambi põlemise signaalide üheks – toit on olemas, saab süüa hakata – signaaliks, mis aktiveerub ükskõik millise komponendi olemas olles.

²⁵ Kui mõistemudel on täielikult formaliseeritud, st infotehnoloogiliste vahenditega kirjeldatud, siis nimetatakse seda informaatikas *ontoloogiaks*.

sutada hulgateooriast välja kasvanud *klasse*²⁶ ja tervete mõistesüsteemidega opereerimiseks sobivat *kategooriate teooriat*.

Olulisimaks *klasside* juures formaliseeritud mehhanismiks on omaduste pärandumine ülemklassilt selle alamklassidele – alamklassil on olemas kõik omadused, mis on olemas tema ülemklassidel. Seejuures võivad mõne omaduse väärtuste suhtes alamklassile kehtida karmimad piirangud, kui need olid samale omadusele ülemklassis²⁷. Ühel klassil võib olla mitu ülemklassi ja/või mitu alamklassi. Alamklassil võib olla ka selliseid omadusi, mida ühelgi tema ülemklassil pole. Kui mingi tegelik objekt või nähtus vastab mingile klassile, siis öeldakse, et see objekt või nähtus *kuulub sellesse klassi* ehk *on selle klassi instants*. Kõik klassi instantsid kuuluvad ühtlasi igasse selle klassi ülemklassi.

Kui mõistete jaoks klassimudelit kasutada, siis klassidevahelisele ülemklassiks olemisele vastab mõistete korral *üldisem olemine* ehk neile klassidele vastavate mõistete vaheline *üldistusseos*²⁸. *Mõistete hierarhiad*, mis on moodustatud vaid sellise seose abil, nimetatakse *taksonoomiateks*²⁹.

Mõistesüsteemides kasutatakse lisaks üldistusseostele veel paljusid muid seosetüüpe, millest vaid osa on hierarhilised. Lugeja on kindlasti kursis nn aadressihierarhiatega, mis vormiliselt võimaldavad erineva taseme komponentidest kokku panna erinevaid elu- ja töökoha aadresse. Mitteformaalselt saame aga seda hierarhiat näiteks elukohasiseselt jätkata või muude, ametlikku aadressihierarhiasse mittekuuluvate tasemetega täiendada.

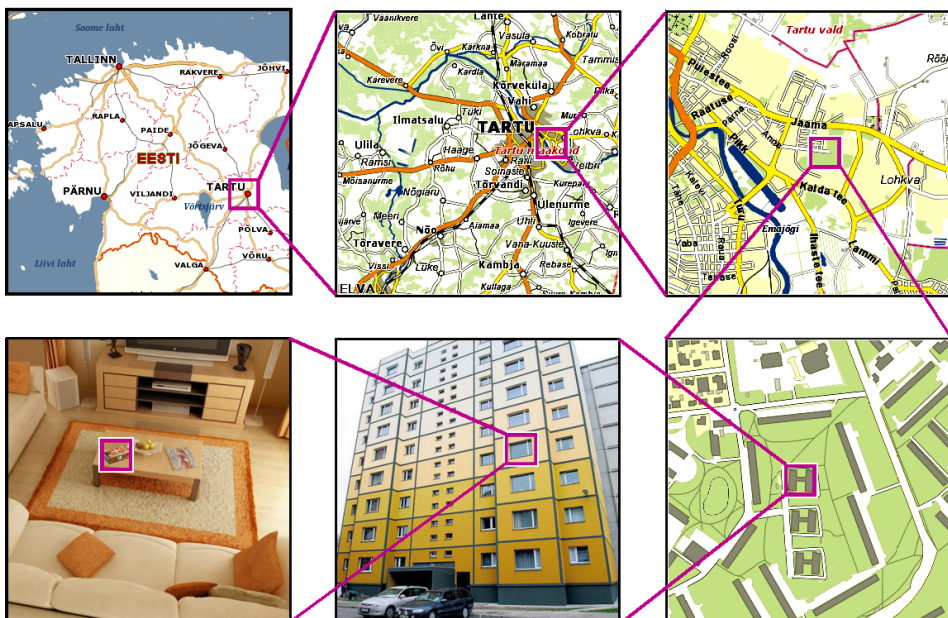
Näiteks joonisel 5.12 on markeeritud ühe Tartu paneelmaja korteri elutoas diivanilaul karbikeses olevate autovõtmete asukoht kuuel erineval üldistustasemel: 1) Eestis, 2) Tartus, 3) Annelinnas, 4) Käbi tänaval, 5) paneelmajas NN ja 6) korteri KK elutoas laual. Loomulikult pole need kuus varianti ammendavad – trepikojad, korrused, lauad, karbid jms on ju alles kasutamata.

²⁶ Ka objektorienteeritud programmeerimises kasutatakse klasse objektide omadus- e tunnuspõhiseks klassifitseerimiseks.

²⁷ Näiteks mõistele *inimene* vastaval klassil on omadus *vanus*, mille väärtus ei ületa 150 aastat. Sama klassi alamklassil, mis vastab mõistele *laps*, on olemas sama omadus, kuid selle väärtuse ülempiiriks loetakse 18 aastat.

²⁸ Inglise keeles nimetatakse mõistetevahelist üldistusseost *is_a*-seoseks.

²⁹ Hästituntud taksonoomiateks on bioloogiliste *liikide* taksonoomiad.



Joonis 5.12. Kõik need pildid annavad, igaüks omal üldistustasemel, diivanilaul olevate autovõtmete asukoha.

Paneme tähele, et kõik need erineva üldistustasemega kohamääratlused on vähemalt vormiliselt korrektsed vastused küsimusele “*Kus su auto võtmed on?*”. Aga kui keegi tõesti selle küsimuse esitab, siis mida talle vastata tuleks? Selgub, et ühte ja ainukest, igas olukorras vastuseks sobivat varianti polegi olemas – õige vastus sõltub küsimuse kontekstist, eeskätt küsija ning vastaja asukohtadest, vahel ka elukohtadest. Enamgi veel – isegi auto asukoht ning auto ja elukoha omandisuhted küsija ning vastajaga võivad mõne iseenesest õige vastuse adekvaatsust oluliselt mõjutada.

Näiteks välismaal puhkusel olles on vastus “*Eestis*” täiesti adekvaatne. Seda on ka vastus “*Kodus*”, kui võtmete asukoht on ühtlasi vastaja koduks. Aga kui küsimus esitati samas elutoas, siis adekvaatsem vastus on, et “*Diivanilaul karbis*” ja igasugune üldisem variant ei ole informatiivne ning tundub kohatu.

Samasugune on olukord ka teiste *mõistehierarhiate* korral – olgu

siis tegu üldistushierarhia või mingi teise seosetüübi³⁰ abil üles ehitatud hierarhiaga. Alati leidub konkreetse objekti tähistamiseks terve rida erineva üldistustaseme ja/või tähendusvarjundiga mõisteid, ning alati on probleem, millist neist konkreetsetes situatsioonides kasutada. Saame opereerida üldistustega ilma detailidesse takerdumata või kasutada vähem või rohkem spetsiifilisi erimõisteid täpsustamiseks seeläbi detaile ilma neid loetlemata, apelleerides mõiste tundmisele kuulaja poolt.

Märgime lõpetuseks, et ka enesesarnasus on olemuslikult hierarhiline nähtus ja ka selle juures tekib *õige* taseme valimise probleem. Näiteks on arstil võimalik valida³¹, millise sisesuhtlejaga patsiendi terveise parandamise asju ajada. Samuti mingi asutuse või ka riigiga asju ajades saab kodanik valida mitmesuguste erinevate suhtlustasandite vahel.

Seega saame kokkuvõttes väita, et suhtlemise juures on adekvaatsuse tagamiseks olulisel kohal asjakohastes hierarhiates orienteerumine ja mõistlike detailsusega üldistustasemete valimine neis.

5.2.4 Kontekst ja terminid

Nägime äsja, et mõisted on abstraksioonid ja sõnad nende nimetused, mida vajame selleks, et mõistetele viidata. Ei saa me ju abstraktset mõistet ennast vahetult sõnumis kasutada.

Ajalooliselt on aga kujunenud nii, et mõistete ja sõnade vahel pole üks-ühest vastavust. Esinevad mõlemasuunalised mitteühesused. Ühele mõistele vastab enamasti³² nimetus igas keeles. Nii mõnelegi mõistele vastab ka samas keeles mitu erinevat nimetust, sünonüümi. Ka vastupidi – leidub nimetusi, mis on antud mitmele erinevale mõistele. Näiteks eestikeelne nimetus *kell* tähistab nii ajanäitajat kui ka kindlat tüüpi helitekitajat. Segadust see siiski ei põhjusta – samale nimetusele vastavad mõisted esinevad tavaliselt oluliselt erinevais seos-

³⁰ Näiteks ravimi *sisaldab*-seos selle toimeainetega laiendab toimeainete *is_a*-klassifikatsioonihierariat.

³¹ Kasutada on mitmesuguse selektiivse toimega ravimid, lihassüstid ja mehaaniline mõjutamine alates ravinõeltest kuni üldvenitusteni.

³² Kuna mõisted tekivad suheldes, suheldakse aga keelt kasutades ja lokaalselt, siis on mõistetav, et erinevate keelte kasutusväljas tekkinud mõistehulgad ei kattu.

tes, võimaldades nimetuse esinemise korral selle seoste struktuuri järgi tähistatavaid mõisteid eristada.

Tund oli lõppemas – ta jälgis kella, ja kui suur osuti jõudis 9 kohale, helistas kella.

Ühelgi inimesel, kes seda teksti loeb, ei tohiks tekkida probleemi eelmisest lausest arusaamisega. Mõistetakse üsna üheselt, et jutt on koolitunnist ja kahest täiesti erinevast kellast. See on nii, sest kui inimene oskab eestikeelset teksti lugeda, siis tunneb ta varasemast ka kooli konteksti ja selles kontekstis eksisteerivaid mõisteid ning nende vahelisi seoseid koos vastavate eestikeelsete nimetustega.

Teksti tõlgendamisel peetakse *kontekstiks*³³ seda teksti ümbritsevaid asjaolusid, sh eelnevat teksti ja tekstiga seonduvaid tekstiväliseid teksti tähenduse avamisel olulisi asjaolusid.

Autor eelistab mõistemudelipõhist definitsiooni:

Kontekst on mõistemudeli osa, mis on vahetult seotud fookuses olevate mõistetega, kuid mis ise pole fookuses.

Sellest definitsioonist järeldub, et me ei saa kunagi konteksti ennast vahetult uurida, sest see “läheb eest ära”: niipea, kui me selle, mida kontekstiks pidasime, uurimiseks fookusesse võtame, ei ole see enam kontekst ja on tekkinud uus kontekst.

Seetõttu on konteksti kasutamine³⁴ suhteliselt keeruline³⁵ ja eba-kindel. Isegi kui suhtleja on kontekstiga tuttav, ei tarvitse sellest piisata nimetusele vastava mõiste üheseks leidmiseks. Näiteks järgmise teksti

³³ *Konteksti* mõiste on praegu veel üldtunnustatud viisil üheselt defineerimata – leidub sadu definitsioone ja selle kohta peetakse teaduskonverentse.

³⁴ Nii elus üldiselt, aga eriti suhtleja mudelites.

³⁵ Lugesel *ehitab* lugeja *konteksti* tekstis leiduvatest nimetustest ja seostest lähtuvalt, kasutades pidevalt oma teadmisi ja kogemusi. Seda konteksti *kasutab* ta omakorda loetava teksti tõlgendamisel, seades tekstis esinevatele nimetustele vastavusse võimalikult adekvaatseid *mõisteid*.

Tund oli lõppemas – ta jälgis kella ja kui suur osuti jõudis 9 kohale, helistas kella – käes oligi kauaoodatud pikk vahetund. Jätnud kella lauale, tormas noormees trepist üles, et enne teisi sööklasse jõuda.

korral pole võimalik üheselt aru saada, kas lauale jäänud kell näitab aega või kasutati seda helistamiseks.

Tehnoloogia arenguga on tekkinud valdkonnad ja kontekstid, milles on vaja valemistamine minimeerida, seda ka väga suurte suhteliste hulkade ja selliste suhtlussituatsioonide puhul, mis leiavad aset haruharva. Enamikus kontekstidest, milles valemistamine kellelegi ebameeldivaid tagajärgi põhjustada saab, on praeguseks välja kujunenud kontekstis oluliste mõistete üks-ühesed nimetused – *terminid*.

Seega terminoloogiaga kaetud kontekstides vastab terminile üheselt konkreetne mõiste. Eeltoodud näites laheneb kooli kontekstis kellade probleem nii, et termin *kell* jääb tähistama ajanäitajaid ja häält tegeva kella jaoks kasutatakse terminit *koolikell*.

Paraku aga on *kontekst* ise üks salakaval hierarhiline mõiste. Just nagu seda on *horisont*. Me kõik teame, mis on horisont, ja ka näeme seda, kuid püüdes kohale minna, et teda lähemalt uurida, osutub, et see ei õnnestu – horisont võib seejuures näida samasugune või ta võib ka täiesti teistsuguseks muutuda – igal juhul jääb ta kaugusse.

Peatükk 6

Juhtimine

6.1 Organisatsioonid ja juhtimine

6.1.1 Organisatsiooni ja juhtimise mõisted

Süsteemi suutlikkusega kulgeda teistsugusesse olekusse (või eesmärgile) mitmesuguseid üksteisest erinevaid teid pidi või erineval viisil, nimetatakse filosoofilises terminoloogias *organisatsiooniks*. Füsioloogias vastab sellele ligikaudu termin *organism*.

Alternatiivsete liikumiste võimalikkus organisatsioonis tähendab, et vastaval süsteemil on *seesmise vabadusi* nende alternatiivide vahel valimiseks.

Näiteks töötav kell on küll süsteem, aga seda ei saa pidada organisatsiooniks, kuivõrd seal on ainult üks tee ja üks viis, kuidas osutid ühest asendist teise jõuavad. Alles siis, kui me laiendame kellana käsitletavat süsteemi kella üles keerava ja selle näidatava aja õigsust kontrolliva ning vajadusel korrigeeriva *kellamehega*, saame sellest süsteemist rääkida kui organisatsioonist, kuna tekkisid alternatiivsed viisid, kuidas osutid ühest asendist teise saavad liikuda. Tõepoolest on kellast ja kellamehest koosneval süsteemil *vabadus va-*



Joonis 6.1. Kellast ja kellamehest koosnev süsteem.

lida, kumba viisi osutite liigutamiseks parasjagu kasutatakse.

Selleks, et kellast ka kasu oleks, s.t et kell kogu aeg võimalikult õiget aega näitaks, tuleb vabadust selle eesmärgi saavutamiseks piirata, reglementeerides, mis asjaoludel ja mil viisil kellamees kella toimetamisesse sekkuma peab või sekkuda tohib.

Kui kella näites oli kellast ja kellamehest koosneval süsteemil vaid üks vabadusaste – kellamees sai oma äranägemise järgi muuta minutiosuti liikumise kiirust¹, siis joonisel 6.2 kujutatud süsteemis on juhil auto juhtimiseks vahendid kahe vabadusastme – suuna ja kiiruse – piiramiseks. Organisatsiooni keerukus ongi määratud selles olevate vabadusastmete hulga. Mida rohkem vabadusastmeid süsteemil on, seda keerukama organisatsiooniga see on². Selleks, et seesmisi vabadus-

astmeid sisaldav süsteem saaks min-
geid ülesandeid täita, tuleb süsteemi
vabadusi sihipäraselt piirata.

Näiteks kõrvaloleval joonisel kujutatud autost ja selle juhust koosneval organisatsioonil on vabadus nii liikumiskiiruse kui ka liikumistrajektoori valimisel. Seejuures autojuht piirab neid vabadusi, valides kõikvõimalikest trajektooridest ja kiirustest auto rooli, pedaale, juhtkange ja -nuppe kasutades konkreetse trajektoori ja kiiruse.

Joonis 6.2. Juhi kasutuses on auto liikumise kahe vabadusastme piiramine: ta saab auto liikumise suunda rooliga ning liikumiskiirust pedaalide ja kangidega muuta

Juhi riietusest ja kehaasendist
võime välja lugeda, et tegemist on

pühapäevasõitjaga, kellel on mingi trikiga õnnestunud kalli sportauto rooli istuda ja kellel lisaks sõiduelamuse saamisele on eesmärgiks auto omanikule tervena tagastada. Me võisime ka eksida ja juhil võib mõni teine *eesmärk*³ olla. See eesmärk võib olla sama, mis sõitu alustades,

¹ Ka liikumissuuna muutmine on kõigest kiiruse muutmine vastasmärgiliseks ja tunniosuti liigub koos minutiosuti liikumisega, lihtsalt hammasülekannete kaudu 12 korda aeglasemalt.

² *Keerulisuse* kohta vt ka lk 114.

³ Auto varastada, tõestada, et ta suudab kiivri ja prillideta raja alla kolme minuti läbida või mis iganes.

kuid võib ka tee peal mingi teise eesmärgiga asendunud olla. Aga üks on selge – juhil on selle auto juhtimisega seoses parasjagu mingi konkreetne eesmärk, sest *ilma eesmärgita ei saa juhtida*. Kui kella näites oli juttu reeglitest, mida kellamees järgima peab, siis ka siin on varjatud kujul hulgaliselt juhtimise reegleid – kui suuna muutmist rooliga on lihtne kirjeldada, siis kiiruse kontrollimiseks kasutatavad kolm pedaali ja käigukang moodustavad juba omaette süsteemi, millega toimetulemise omandamine moodustab märkimisväärse osa autojuhtimise õppimisest.

Üldistades eelnevat arutelu, saame väita, et juhtimine on protsess, mis toimub seesmisel vabadusastmel omaval ja mingit eesmärki täitvas süsteemis, mille struktuuris saab⁴ eristada piisava arvu vabadusastmetega *juhitava osa* ja juhtiva osa ehk juhi⁵, mis organisatsiooni struktuurseid seoseid kasutades piirab juhitava osa vabadusi, lähtudes organisatsioonilt saadud eesmärkidest.

Paneme tähele, et me eristame kolme erinevat süsteemi – juhitav süsteem (näiteks auto), juhtiv süsteem (autojuht) ja neist kahest koos nendevaheliste seostega (rool, pedaalid, käigukang) moodustuv ja kummastki komponendist keerukama struktuuriga organisatsioon (juhiga auto). See ei välista komponentsüsteemide (ega ka ühissüsteemi) samaaegset kuulumist mingitesse teistesse struktuuridesse ja organisatsioonidesse. Näites toodud auto kuulub samaaegselt koos mehaanikute, pilootide ja teiste autodega mingisse võistkonda, mis omakorda kuulub automootoreid tootva tehase arendusosakonna koosseisu jne. Autojuht aga kuulub mingisse leibkonda, tõenäoliselt ka mingisse töökollektiivi ja võimalik, et ka mingisse klubisse.

Selline juhitava ja juhi samaaegne kuulumine erinevatesse hierarhiatesse viitab võimalusele, et igal vaadeldaval süsteemil leidub alati mingi üldisem süsteem, kes/mis saab vaadeldavale süsteemile eesmärgi seada. Selliste potentsiaalsete eesmärgistajate mitmesus aga jätab alles küsimuse, et kes ikkagi juhile eesmärgi seab ja kuidas konkreetse

⁴ Vähemalt kõrgemal tasandil oleva teadvusega olendi poolt vaadates.

⁵ Kasutame sõna *juht* siin ja edaspidi üldistatud tähenduses – lisaks autojuhtidele ja tehasedirektoritele või korporatsioonide nõukogudele ja riikide valitsustele ka kõikvõimalike mehaaniliste ja/või elektrooniliste seadmete kohta, mis tegelevad mingi teise süsteemi juhtimisega, nagu seda teevad autopiloodid, termoregulaatorid jms.

juhtimissüsteemi eesmärgid kujunevad. Vaatleme neid küsimusi lähemalt järgmises alajaotuses kohe pärast juhtimise definitsiooni:

Juhtimine on juhitava vabaduste sihipärane piiramine, et saavutada juhtimiseesmärk.

6.1.2 Eesmärgistamise skeemid organisatsioonides

Pealkirjas kasutatud sõna *organisatsioon* on siingi kasutusel lähtuvalt selle sõna filosoofilisest tähendusest, tähistades niiviisi igasuguseid juhtimiseks piisavalt keerukaid süsteeme – nii bioloogilisi, sotsiaalseid kui ka inimese poolt ehitatud. On loomulik, et eesmärkide allikad ning nende tekkimise mehhanismid ei tarvitse nii erinevatel struktuuridel ühesugused olla. Vaatleme neid eraldi.

Sotsiaalsed struktuurid

Juhi kuulumine komponendina organisatsiooni vastab kõige kergemini mõistetavalt just sellistele organisatsioonidele, mille on moodustanud inimesed ja mida juhivad inimesed. Nimetame neid siinkohal ühiselt *asutusteks*. Kõigil sellistel asutustel ning nende struktuuridel fikseeritakse eesmärk vastava struktuuriüksuse moodustamisel olenevata sellest, kas tegemist on äriühingu, mittetulundusühingu, sihtasutuse, fondi, ministeeriumi, riikliku ameti, riigi jne või mõne loetletu allüksusega.

Asutused moodustavad hierarhilisi struktuure selliselt, et igaühel neist on mitmeid ülemaid asutusi, mille eesmärgid hierarhias madalamal tasemel olevaile asutusele laienevad. On kolm mehhanismi, mille alusel selline eesmärkide ülalt alla delegeerimine toimub:

1. Asutus ongi moodustatud ülema asutuse poolt kindlate eesmärkide täitmiseks.
2. Asutus asub mingi riigi territooriumil ja allub selle riigi seadustes sätestatud reeglitele ja eesmärkidele.

3. Asutus on mingite oma eesmärkide saavutamiseks koos teiste asutustega moodustanud ühise katusorganisatsiooni, millele asutajad ühiselt eesmärgid seavad. Katusorganisatsiooni arenedes võib sellel tekkida uusi eesmärke, mis siis liikmetele laienevad.

Iga asutus on samaaegselt eesmärgiliselt seotud mitmetes hierarhiates, nii nagu ka asutuse juhtimisega tegelevad isikud jagavad eesmäärke veel teistegi sotsiaalsete struktuuridega. See paratamatult tekitab olukord tekitab enamasti juhtidele vastuoluliste eesmärkide komplekti.

Sotsiaalsetes struktuurides pole eesmärkide päritolus vähimatki müstilist. Pigem võib siin leida eetika valdkonda kuuluvaid probleeme.

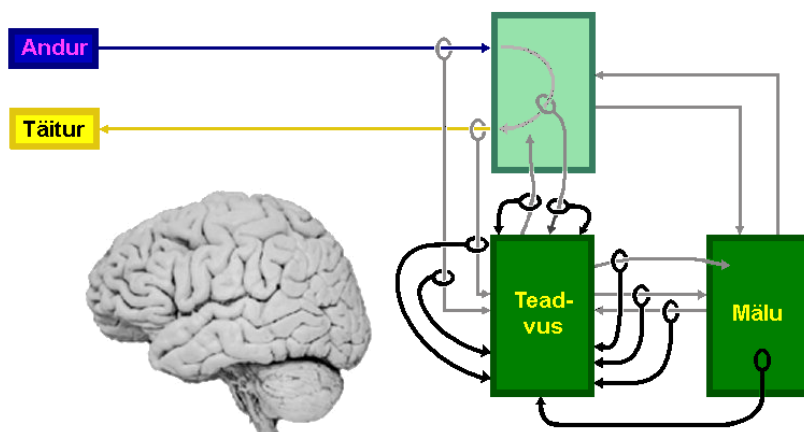
Teadvusega süsteemid

Teadlased on teadvuse olemuse üle viimasel paaril aastasajal tõsiselt arutlenud, kuid ühese määratluseni pole jõutud. Siiski, elementaarse väitega, et teadvusega süsteemid on need, mis teavad, on kõik päri. Lahknevus tekib selles, mida peaks teadma ja mida täpselt teadmine tähendab.

Pakume välja, et teadvuseks piisab, kui süsteemil on võime tunda ära kohti ning situatsioone, milles ta varem olnud on ning kontrollida oma sisemisi abstraktse taseme infoprotsesse. Ka siin “jäävad otsad lahtiseks” – ei seleta me ju lahti, mida me täpselt peame sisemiste infoprotsesside abstraktseks tasemeks ning mida selle kontrollimiseks. Mõningase vastusevariandi neile küsimustele pakub välja joonisel 6.3 kujutatud skeem, kus ringike mingi joone alguses tähistab sisemist, skeemil ringikest läbivat infoliikumist monitoorivat andurit.

Paraku ei aita see meid nende süsteemide eesmärkide päritolu selgitamisel. Isegi inimindiviidi kui teadvust omava elussüsteemi eesmärkide päritolu pole selge. Indiviid kuulub mitmetesse sotsiaalsetesse süsteemidesse ja saab sealtkaudu hulga erinevaid, kohati vastuolulisi eesmärgipüstitusi. Need eesmärgid ei allu üldjuhul lihtsale liitmistehetele ega ka mõnele muule vormilisele käsitlusele, mis tulemina annaks indiviidi eesmärgid. Indiviid suudab enesele ise eesmärke seada.

Eriti segaseks läheb olukord, kui vaatluse alla võtta asotsiaalsed isikud, kellel sotsiaalseid struktuure pidi eesmärgipüstitusi praktiliselt pole. Nende puhul võib eriti sageli jälgida näiliselt eesmärgitut eksisteerimist.



Joonis 6.3. Teadvusega süsteem monitoorib oma sisemist infotöötlust.

Kokkuvõttes saame vaid väita, et teadvusega süsteemid arvavad enesel olevat võime iseseisvalt eesmärgi seada, s.t konstrueerida min-geid tulevikuseisundeid ja siis nende poole püüelda.

Kõik see viib üha enam arusaamiseni, et on olemas kaks olemus-likult erinevat eesmärgi määratlust:

eesmärk tegutseja jaoks on eesmärk, mis püstitatakse *enne tegutsema hakkamist* ja mille saavutamist tegevuses ka taotletakse. See on seda tüüpi eesmärk, mida sotsiaalsetele süsteemidele seatakse ja mida teadvusega süsteemid saavad enesele ise seada;

eesmärk vaatleja jaoks on pigem vaatlejapoolne *tagantjärele* või *kõrvalseisja* tarkus, et protsess toimub või toimus viisil, justnagu tegutsejal oleks selline eesmärk, ja sõltumata sellest, kas tegutseja seda ise teadis või mitte. Vaatlejana toimiva inimese jaoks on selline süsteemide eesmärgistamisega mudel väga hea. Isegi nii hea, et see “justnagu tegutsejal oleks eesmärk” mudeli määratluses ununeb ja asendub väitega “tegutsejal on eesmärk”,

ning me ei erista neid väiteid teineteisest, kasutades mõlemat läbisegi. Seetõttu on ka lk 138 raamistatud ja sotsiaalsete ning teadvusega süsteemide jaoks igati korrektne juhtimise definitsioon üldjuhul mõneti desorienteeriv, jättes mulje, et juhtimise atribuudiks olev eesmärk peaks justkui olema püstitatud enne juhtimisprotsessi algust.

Bioloogilised ja ökoloogilised struktuurid

Eriti ilmneb eelmises jaotuses kirjeldatud kahte tüüpi eesmärkide erinevus evolutsioonilise tekkega teadvuseta süsteemides. Sellisteks on nii madalamad bioloogilised organismid, teadvusega organismide sisesüsteemid kui ka *ökoloogilised süsteemid*, s.t teadvuseta bioloogiliste süsteemide terviklikud kooslused.

Ei ole ju keegi kunagi seadnud eesmärki, et bakterid peaksid välja arendama fotosünteesi mehhanismi süsihappegaasist glükoosi tootmiseks. Ometi on evolutsiooni käigus fotosüntees välja arenenud. Kogu aeg on mängu juhtinud juhuslikkus. See on hämmastav, milline jõud on juhuslikkusel. Näiteks me teame, et radioaktiivsetel isotoopidel on iseloomulik poolestusaeg, s.o kindel aeg, mille jooksul pool esialgsest isotoobi kogusest laguneb. See on hästi kontrollitud füüsikaseadus. Aga milline on selle seaduspära toimemehhanism? Kui me võtame kaks selle isotoobi aatomit, kas nad lepivad omavahel kokku, kumb neist poolestusaja möödudes laguneb? Kas see lagunemine leiab aset täpselt poolestusaja möödudes? Kas isotoobid ise üldse teavad, et neil tuleb mingi seaduse järgi laguneda?

Üksikaatomite korral tunduvad need küsimused kohatud. Seda enam, et need kaks konkreetset aatomit ei tarvitsegi poolestusajale alluda – seda teeb vaid statistiliselt suur kogus aatomeid.

Õnneks on evolutsioonil olnud aega – fotosünteesi väljakujunemisele kulus hinnanguliselt poolteist miljardit aastat. Selle aja jooksul osales juhuslikes katsetes hea (s.t usaldusväärse) tulemuse saamiseks statistiliselt piisavalt suur hulk baktereid. Tee fotosünteesile algas sellest, et ürgmere pinnakihtides tappis päikeseekiirgus oma biomolekule lagundava toime tõttu baktereid. Aga bakterid, mis juhuslikult sisaldasid pigmendina käituvaid molekule⁶, osutusid oma pigmendita kaastega võrreldes eelisolukorras olevat, sest neis ei põhjustanud mitte kõik neeldunud valguskvandid pöördumatuid kahjustusi. Kuigi selline erinevus on algul imepisike, tingib see pika aja jooksul vee pindmiste

⁶ Pigmentmolekulid neelavad pigmentile omases lainepikkuse vahemikus valgust, ilma et nad laguneksid, ja seejärel hajutavad saadud energia vaikselt ümbruskonda ilma seal midagi lõhkumata. Teistel lainepikkustel pigment valgust ei neela; niiviisi muudab ta peegeldunud valguse spektrit võrreldes pealelangeva valguse spektriga ning paistab seetõttu värvilisena.

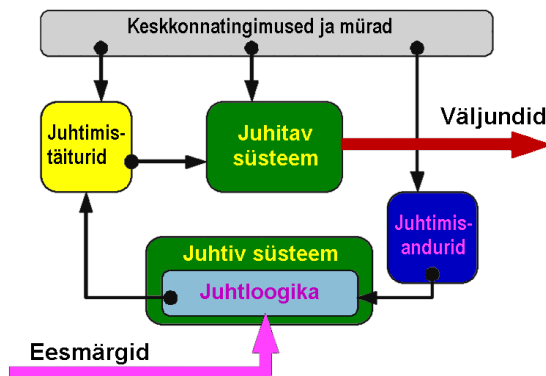
kihtide asustamise bakteritega, kelle liigitunnuses on mingit tüüpi pigmendi sisaldamine. Sellised bakterid on valguse suhtes immuunsed.

Mingit eesmärki ju polnud, oli vaid väike erinevus teatud spetsiifilise juhusliku hälbega ja ilma selle hälbega bakterite statistilises elueas; oli palju aega, et seda väikest erinevust statistiliselt veenvaks ja *sil-maga nähtavaks* muuta. Tagantjärele tarkusega on aga inimesel toona toimunud lihtsam seletada kiirgusprobleemi lahendamiseks püstitatud eesmärgi täitmisena.

6.2 Juhtimisskeemid

Juhtimissüsteeme, eriti inimese poolt konstrueeritud, saab nende struktuuri ja funktsioneerimise järgi liigitada lihtsamateks ja keerulisemateks. Vaatleme järgnevalt nende lihtsustatud skeeme, alustades lihtsamast.

6.2.1 Tagasisideta juhtimine



Joonis 6.4. Tagasisideta juhtimise skeem. Juhitav süsteem annab juhtimise eesmärgid juhtimistäiturite kaudu juhitava süsteemile. Juhitav süsteem võib arvestada keskkonnatingimustega.

Tagasisideta juhtimine on lihtsaim juhtimisviis. Selle korral kasutatakse sisendina keskkonnast saadavaid kaudseid signaale. Nende alusel muudetakse juhitava süsteemi seadeid eesmärkide poolt etteantud reeglite järgi. Sellisteks sisenditeks võivad olla näiteks kellaaeg,

kuupäev, välistemperatuur või midagi muud, mis pole otseselt seotud süsteemi eesmärgi täidetuse mõõtmisega.

Joonisel 6.4 on sellise juhtimisviisiga süsteemi lihtsustatud üldmudel. Väljundite tegelikku käitumist juhtiv süsteem arvesse ei võta. Keskkonnatingimused ja mürad toimivad praktiliselt kõigile süsteemi osadele.

Tagasisideta juhtimisskeemi järgi töötab näiteks tänavavalgustuse kella järgi⁷ juhtimine – igal öhtul kindlal kellaajal lülitatakse valgustus sisse ja igal hommikul, jällegi kindlal kellaajal, jälle välja.

Teiseks näiteks on iseteenindavas söögikohas kasutatav joogiautomaat (vt joonis 6.5), mis hakkab mahla klaasi laskma niipea, kui klaas automaadi toru alla panna. Mahl jääb jooksmas seni, kuni klaas ära võetakse, sest kui klaas (või miski muu) on toru all, hoiab see anduriks olevat linki asendis “Klaas on ees”, mida tõlgendatakse vajadusena mahla klaasi lisada.

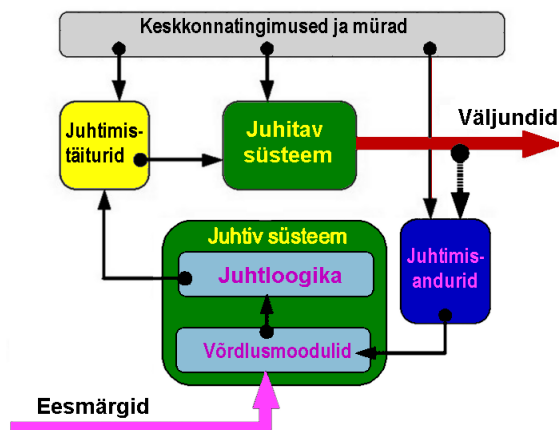
Mõlemas näites näeme, et niisugune juhtimine on täiuslikkusest kaugel – tulede lülitamine ei arvesta sellega, et pilvise ilmaga läheb varem pimedaks kui pilvituga ja päikese loojumis- ning tõusmiskellajad sõltuvad oluliselt ka aastaajast. Teises näites aga tekivad tõrked, kui andurlingi asend muutub millegi muu kui joogiklaasi mõjul või kui täis saanud klaasi ei võeta aparaadi alt ära.

See juhtimisskeem on tagasisideta, olenemata sellest, et juhtimissüsteemi andurid *mõõdavad* keskkonna muutujaid, näiteks temperatuuri või valgustatust. Selle skeemi järgi saab ehitada valgustussüsteemi, mis lülitab valguse sisse, kui valgustatus langeb allapoole et-



Joonis 6.5. Mahlaautomaat, milles klaasi mahla täitmist juhitakse lingi asendiga. Lingi asend ei ole seotud mahla tasemega klaasis ega ka toru all just klaasi olemisega.

⁷ Tänapäeval enam nii ei tehta, aga nõukogude ajal toimus suurte paneelmajadest koosnevate linnakute – Mustamäe, Öismäe, Annelinn jmt – kütmine põhimõtteliselt sama skeemi järgi. Linnavalitsus oli välja andnud käskkirja, et kütteperiood algab 15. oktoobril ja lõpeb 15. mail. Igal aastal lülitati 15. oktoobril katlamajades kaugküte sisse ja 15. mail jälle välja. Seda sõltumata ilmast, sest plaanimajanduslikus juhtimispraktikas oli meie laiuskraadide jaoks kütteperiood nii defineeritud.



Joonis 6.6. Lihtsa tagasisidestatud juhtimise skeem. Võrreldes tagasisidestama skeemiga, on lisandunud väljundsignaali monitoorivad andurid ja võrdlusmoodul juhtivas süsteemis.

teatud piiri ja uuesti välja, kui valgustatus on tõusnud sellest piirist üle. (Muide, nii tehes peame hoolitsema, et sisselülitatav valgus ei langeks andurile⁸ – muidu hakkaks lamp vilkuma, sest põleva lambiga oleks anduri valgustatus piisavalt suur, et lamp jälle välja lülitada.) Tänavavalgustuse juhtimiseks aga on selline tagasisidestamata juhtimisskeem juba täiesti kasutatav ka muutuva päeva pikkuse ja pilvisusest tuleneva valgustatuse kõikumise tingimustes.

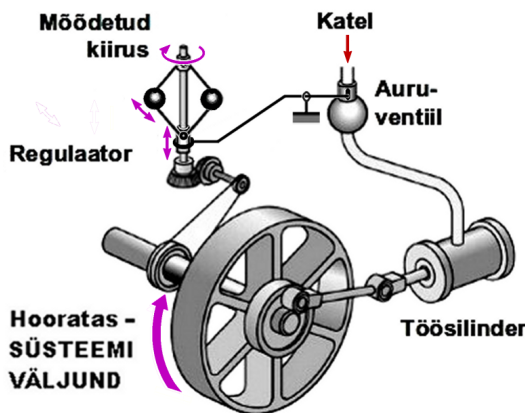
Ka katlamajast keskküttetrassi pumbatava vee temperatuuri muutmine olenevalt välistemperatuurist aitab oluliselt kaasa mõistliku toasooja hoidmisele kõikuva välistemperatuuri tingimustes.

6.2.2 Lihtsa tagasisidega juhtimine

Eelmise juhtimisskeemiga võrreldes oluliselt parem tulemus saadakse tagasisidestatud juhtimissüsteemidega, s.t selliste süsteemidega, mis ühel või teisel viisil kontrollivad juhtimise tulemust. Lihtsa tagasisidega juhtimiseks nimetame sellist juhtimist, kus juhtimisülesandeks on süsteemi mingi füüsilise parameetri – kiiruse, temperatuuri, vede-

⁸ Valguse (väljundi) langemine andurile (sisendile) oleks süsteemis *positiivne tagasiside*.

likutaseme vms – hoidmine kindlal, enamasti *seadeväärtuseks* nimetataval väärtusel. Joonisel 6.6 on lihtsustatult kujutatud lihtsa tagasisidega juhtimissüsteemi skeem. Erinevalt tagasisideteta juhtimisskeemist on nüüd olemas kontrollitava parameetri väärtuse mõõtmiseks väljundit jälgivad andurid ja võrdlusmoodul, et võrrelda andureilt saadavat mõõtmistulemust eesmärgiks oleva seadeväärtusega. Nende erinevuse korral rakendub juhitava süsteemile tarvilik juhtimismõjutus, mis juhtloogikasse sisseehitatud reeglite järgi tuleneb mõõtetulemuse ja seadeväärtuse erinevusest.



Joonis 6.7. Tagasisidestatud juhtimissüsteem: James Watti poolt 1877. a aurumasinas kasutusele võetud pöörlemiskiiruse stabilisaator.⁹

Joonisel 6.7 olev regulaator töötab järgmiselt: aurumasina väljundilt – hoorattalt – on tehtud ülekanne, mis paneb koos väljundvõliga ka regulaatori ümber oma vertikaaltelje pöörlema. Regulaatori pöörlemiskiiruse suurenemisel kasvab ka tema ülaotsa küljes rippuvatele pommidele mõjuv tsentrifugaaljõud ning pommide rippumise suuna hälve vertikaalst. See hälve kantakse hoovastiku kaudu üle auruventiilile nii, et hälbe suurenemisel tõmmatakse ventiili koomale – toimib *negatiivne tagasiside*. Kui auru soovitud kiiruse jaoks liiga väheks jääb või koormamise tõttu pöörlemissagedus väheneb, väheneb see ka regulaatoril ja pommid langevad madalamale, suurendades masinale antava auru voogu.

⁹ Vt Wikipediast http://en.wikipedia.org/wiki/Centrifugal_governor

Autode püsikiiruse hoidjate ning lennukite autopilootide esimese põlvkonna¹⁰ seadmed toimivad üsna sarnaselt. Nende andurid on küll elektromehhaanilised või elektroonilised, kuid täitur liigutab trossidega vahetult gaasipedaali ja tüüre. Kõlava nimetuse – autopiloot – taga varjab end seade, mis kontrollib kolme lennuki parameetrit – kõrgust, lennusuunda ja kiirust – hoides neid etteantud väärtustel.

Sellised lihtsad tagasisidestatud juhtimissüsteemid ei tarvitse olla stabiilsed. On kaks erinevat võimalust ebastabiilsuste arenguks. Esimeseks võimaluseks on süsteemi muutumine ostsillaatoriks (vt lk 70). Teiseks võib süsteem lihtsalt eemalduda oma töörežiimist.¹¹ Halval juhul võib nii esimene kui ka teine lõppeda katastroofiga – kui süsteem liigub olekuruumis piirkonda, milles lõpevad tema energia- või tugevuseressursid.

Tagasisidestatud juhtimissüsteemide stabiilsusprobleeme uurisid XIX sajandi lõpus ja XX sajandi alguses inglise matemaatik Edward Routh, vene matemaatik Aleksandr Ljapunov, meile juba tuttav Harry Nyquist ja mitmed teised. Tänapäevase eestikeelse ülevaate juhtimissüsteemide analüüsi meetoditest ja stabiilsuse tingimustest saab TTÜ automaatikatudengeile koostatud Raul Naadeli õppematerjalist [16].

Ka sellisel lihtsal tagasisidestusel on omad probleemid. Mitte see pole selle skeemi suurim puudus, et selliselt tagasisidestatud süsteem võib ostsilleerima hakata – selle asemel, et aurumasin ühtlaselt seadekiirusel töötaks, võib selle töökiirus ümber seadeväärtuse kõikumajääda.¹² Probleem on pigem see, et endiselt puudub kontroll tegeliku eesmärgi saavutamise üle – need parameetrid, mille väärtusi kontrollitakse, on ju enamasti vahe-eesmärgid. Ei ole ju autosõidu päris-eesmärgiks kindla kiirusega sõitmine. See võib olla mõistlik vahe-eesmärk sobivate teeolude korral. Kui meile aga jääb ette aeglasemalt sõitev sõiduk, siis püsikiiruse hoidja korraldaks ilma kõrvalise sekku miseta meile avariit.

¹⁰ Nende seadmete järgmised põlvkonnad baseeruvad juba arvutustehnikal ning on integreeritud vastavalt autode ja lennukite liikumisandurite, erinevate täiturite ja pardaarvutitega ühtsesse süsteemi. See võimaldab oluliselt paindlikumat viisi nii seadeväärtuste muutmiseks kui stabiilsuse tagamiseks.

¹¹ Näiteks kui autot püütakse pidurdada libedal teel, võib ta kaotada juhitavuse.

¹² Tagasisideahela saab konstrueerida selliselt, et süsteem ei läheks ostsilleerima.

6.2.3 Adaptiivne juhtimine

Juhtimisviisi, mis jälgib süsteemi väljundi kaugust¹³ juhtimise eesmärgist ja kasutab seda kaugust koos asjassepuutuvate keskkonnatingimustega tagasisideks ning suudab eesmärgi asendada vahe-eesmärkide jadaga, mida olude muutudes korrigeerida saab, nimetame adaptiivseks juhtimisviisiks (lad k *adaptare* – sobituma, kohanema). Vahe- ehk alleesmärgid on sisuliselt allsüsteemidele antavad ülesanded, mille täitmine on eesmärgi saavutamiseks tarvilik. Need ülesanded püstitatakse allsüsteemide eesmärkidena, kusjuures keskkonna või ka mõnede sisemise allsüsteemi seisundi muutumisel võib olla vaja mõne allsüsteemi eesmärki muuta. Selline alleesmärkide dünaamiline juhtimine eeldab vähemalt kahetasemelist hierarhilist juhtimissüsteemi (vt joonist 6.8), kus kõrgem juhtimistase tegeleb vahe- ning alleesmärkide püstitamisega ja alltase nende täitmisega.

Adaptiivsed juhtimiskeemid on vabad eelmise kahe juhtimisviisi vigadest. Samas on selline juhtimisviis enamasti väga komplitseeritud.

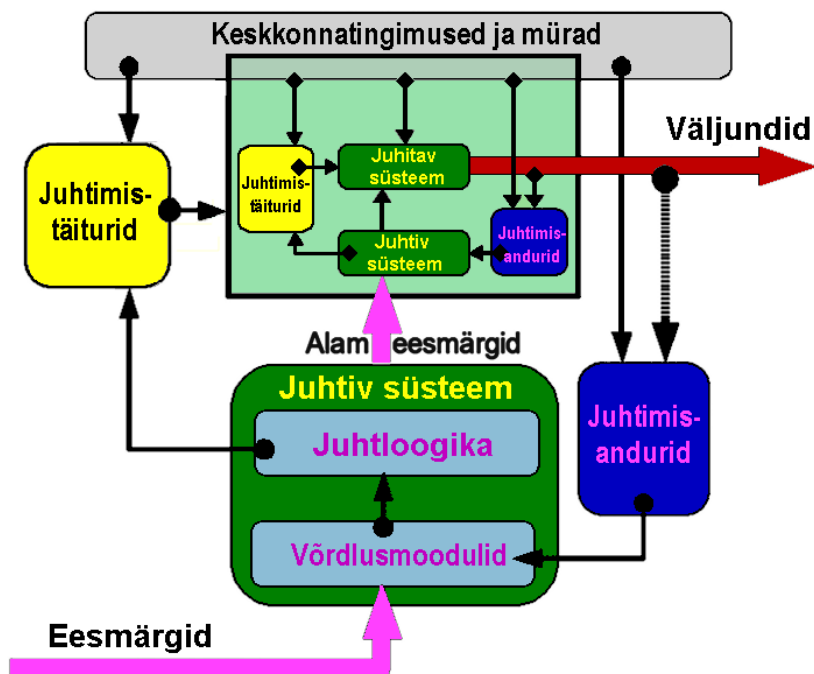
Lisaks sellele, et vahe-eesmärgid moodustavad lõppeesmärgi saavutamisele suunatud jada, võivad need jaguneda ka paralleelselt täidetavateks alleesmärkideks. Vahe- ja alleesmärke võidakse delegeerida täitmiseks erinevaile juhtidele.

Vaatleme adaptiivse juhtimise näitena ülesannet jõuda autoga kindlaks kellaajaks etteantud kohta – olgu selleks Tartust Tallinna jõudmine. Esimese taseme vahe-eesmärgid võivad sel juhul olla:

1. Valik, kas sõita Tartu-Tallinna maanteed või Piibe maanteed pidi.
2. Tartust valitud maanteele väljasõitmine.
3. Maanteed mööda Tallinnani sõitmine.
4. Tallinnas tegelikku sihtkohta sõitmine.

Kõik need vahe-eesmärgid jagunevad omakorda järgmise taseme vahe- ja/või alleesmärkideks. Alleesmärke on mõtet eristada, kui me saame neid teistele juhtsüsteemidele delegeerida. Näiteks maantee sõidul võib autojuht jagada juhtimise kaheks samaaegselt täidetavaks alleesmär-

¹³ Siin peetakse silmas algebralist üldistatud kaugust, mille dimensioon sõltub konkreetsest juhitavast süsteemist ja selle juhtimise eesmärgist.



Joonis 6.8. Adaptiivne juhtimisviis. Olulised erisused on väljundi monitoorimine, madalama(te) taseme(te) alljuhtimissüsteemi(de) olemasolu ja allsüsteemi(de) dünaamiline eesmärgistamine. On näha juhtimise hierarhiline enesesarnane struktuur (lihtsuse huvides on kujutatud vaid 2 taset) – välimine juhtiv süsteem seab sisemisele juhtivale süsteemile eesmärgi ja kontrollib kogu alltaseme organisatsiooni. Mõlemal kujutatud organisatsioonitasemel on ühine keskkond, ühine väljund ja ühesugune struktuur, aga eesmärgid saab iga tase oma ülemtasemelt.

giks – ühtlase liikumiskiiruse hoidmiseks ja auto sõidurajal hoidmiseks – ning kiiruse hoidmise delegeerida püsikiiruse hoidjale. Seejuures peame olema valmis liiklusolude muutumise korral all- ja vahe-eesmärkide jaotust üle vaatama ja muudatuste tegemise korral juhtimist vastavalt korrigeerima.

Tänapäeval on laialt levinud GPS-põhised navigeerimisseadmed, millel on kasutada korralikud digitaliseeritud kaardid ja mis, saades spetsiaalseid raadiosignaale vähemalt neljalt satelliidilt¹⁴, oskavad neilt saadavate andmete põhjal oma asukohta ja kiirust arvutada. Üks selline seade on joonisel 6.9.

GPS-seadmed ei ole iseene-
 sest veel juhtimisseadmed, sest
 neil pole auto vabadusastmete
 vahetuks kontrollimiseks sobivaid
 täitureid. Aga nad oskavad punk-
 tist A punkti B sõitmise ülesannet
 mõistlikeks allülesanneteks jagada
 ja hääle ning graafilise liidese
 vahendusel autojuhile juhtimis-
 otsuste tegemiseks oluliselt abiks
 olla, tõhustades oluliselt kogu
 süsteemi¹⁵ eesmärgile orienteerit-
 tud juhtimist. Seda teevad nad
 juhtimissoovitusi andes, lähenevatest manöövritest juhti informeerides ja pidevalt täpsustuvalt kohalejõudmise aega prognoosides.

Võib arvata, et selline juhtimissüsteem on täiuslik, kuid seegi jääb mitmete olukordadega jänni. Näiteks võivad sõidutingimused teeremontide, teedevõrgu muutumise jms tõttu erineda seadme mälus olevatest kaardiandmetest. Selline vastuolu saab ilmsiks aga alles siis, kui süsteem on meid juhatanud olukorda, milles me tema juhiseid enam täita ei saa. Tõsi küll, enamasti adapteerub süsteem jooksvalt



Joonis 6.9.
 GPS-navigatsiooniseade.

¹⁴ GPS-süsteemis on 24 satelliiti, mille orbiidid on valitud nii, et igas Maa punktis on neid taevavõlvil selle punkti asukoha kindlakstegemiseks piisav arv. Paraku on kasutatav raadiosignaal detsimeeterlainelas ja ei levi läbi tahkete takistuste. Isegi paksem õhukiht, mida peab läbima horisondilähedaste satelliitide signaal, samuti puude võrad, võivad satelliidi signaali muuta mittekasutatavaks.

¹⁵ Kogu süsteem on siis auto, autojuht ja GPS-navigatsiooniseade.

uuele olukorrale ja juhatab meid kohale, kuid kogu teekond tervikuna ei tarvitse enam optimaalne olla. Kui ilmnenud takistusega oleks juuba teekonna esialgsel planeerimisel arvestatud, siis oleks tõenäoliselt saanud valida kiirema tee¹⁶.

Teine olukord, kus GPS-põhine navigatsiooniseade juhtimisega hakkama ei saa, on siis, kui teeolude tõttu ei ole näha piisaval arvul satelliite¹⁷ ja GPS ei suuda sõiduki asukohta määrata.

Adaptiivse juhtimisviisi näiteks on ka see, kuidas karjalise eluviisiga kiskjad (näiteks lk 107 jutuks olnud hundid) saaklooma (näiteks lammast lambakarjast) püüavad. Karja juht teeb kõigepealt maastikku, tuule suunda ja lammaste paigutust arvestades tegevuskava, seades vahe-eesmärgid – valib (näiteks karjast veidi eemaldunud) lamba, keda rünnata ning lammastest allatuult asuvad ründepositsioonid, kust rünnakut alustada. Hundid liiguvad rünnakupositsioonidele ja juhi märguande peale alustavad rünnakut. Uute asjaolude ilmnemisel aga korrigeeritakse vajadusel tegevuskava või ka vahe-eesmärke, näiteks:

- kui esialgselt eraldi olnud ja ohvriks valitud lammas ühineb karjaga, siis võidakse see lammas rahule jätta ja valida uus, kehva jooksjana näiv ohver;
- kui nähtavale ilmub loom, kes samuti sobib saagiks, näiteks üksik metskits, võidakse lambad rahule jätta ja hoopis kitsejahiga jätkata;
- kui nähtavale ilmub konkureeriv kiskja, siis ...
- jne.

Adaptiivne juhtimine ja evolutsioon

Eelkirjeldatud adaptiivse juhtimise korral korrigeeris juhtimissüsteem olenevalt keskkonnatingimustest vajadusel juhtimise vahe-eesmärke ja vastavalt ka süsteemi käitumist. Pikemaajaliste protsesside korral

¹⁶ Kui meid poolelt Tartu-Tallinna teelt silla remondi tõttu Piibe maanteele suunatakse, siis oleks kohe Tartus Piibe tee suundumine olnud märksa kiirem võimalus Tallinna saamiseks.

¹⁷ Sest need jäävad metsateedel puuvõrade varju, suhteliselt kitsastel kõrgete hoonetega ääristatud tänavatel hoonete varju või sõidame parasjagu tunnelis või kinnises parkimismajas.

aga saame jälgida organisatsiooni enese muutmist¹⁸ täiendavate andurite ja/või juhitavat süsteemi kontrollivate täiturite lisamise või ka andureilt saadava teabe töötamise algoritmide muutmisega. Kuna elussüsteemides ilmnevad sellised muutused vaid liikide evolutsiooni tulemusena, siis nimetamegi seda suhteliselt aeglast, aga juhtimissüsteemi muutumise vaatekohalt olulist tagasisidemehanismi *evolutsiooniliseks*. Kasutame seda nimetust ka mittebioloogiliste juhtimissüsteemide korral.

Selgitame seda eespool käsitletud tagasiside näiteid mõtteliselt edasi arendades.

Püsikiiruse hoidjate uute mudelite ilmumine, et vältida otasõitu aeglasemalt ees sõitvatele autodele. Uuel mudelil on lisatud distantisandurid, mis avastavad ees aeglasemalt sõitva sõiduki ja mõõdavad kaugust selleni. Ühtlasi on korrigeeritud ka algoritmi selliselt, et kui avastatakse eessõitev aeglasem auto, siis loobutakse oma seadekiiruse hoidmisest ja lülitatakse ümber eessõitva autoga distantse hoidmisele.

GPS-põhise navigatsioonisüsteemi täiendused

- a) güroskoopilise kompassi ja rataste pöörlemiselt saadava liikumissignaali lisamine süsteemile võimaldab asukohta, liikumissuunda ja liikumiskiirust määrata ka siis, kui piisaval hulgal GPS-satelliite parajasti näha pole;
- b) raadiokanalite kaudu kaardiuuenduste jooksev hankimine kaardiservereilt võimaldab teeremontide ja ajutiste liikluskorralduse muudatustega adekvaatselt arvestada;
- c) raadiokanalite kaudu hetke liiklusolude kohta teiste samas piirkonnas liikuvate sarnaste süsteemidega informatsiooni vahetamine aitab tiheda teevõrgu korral¹⁹ ummikuid vältida.

Siin toodud näidetes seisnes *tagasiside* selles, et juhtimissüsteemi piiratuse ilmnemisel täiendati konstruktsiooni. Pangem tähele: mitte nende piiratud juhtimisvõimega seadmete eneste konstruktsiooni, vaid täiendati nende seadmete uute mudelite konstruktsiooni. Osa uuendustega mudelitest kinnistus, teised aga tõrjuti koos vanade mudelitega ajapikku kasutusest välja. Näeme suurt sarnasust bioloogilise

¹⁸ Enamasti on see juhi ja juhtimisviisi, harvem ka juhitava süsteemi muutmine.

¹⁹ Näiteks linnades.

loodusliku arenguga.

Tabel 6.1. **Bioloogilistes ja tehissüsteemides toimiva evolutsioonilise tagasiside võrdlus**

| Aspekt | Bioloogiline süsteem | Tehissüsteem |
|-------------------------------|----------------------------------|---|
| ajend muudatuseks | paratamatu | puuduste ilmnemine või paremini tegemise idee |
| muudatuse tegija | juhuslikud mutatsioonid | insenerid |
| muudatus | isendi geneetiline informatsioon | seadme mudeli riistvara |
| muudetud on | iga isend | seadme uus mudel |
| muudatust kinnistav mehhanism | looduslik valik | turg |

Tabelis 6.1 on esitatud evolutsioonilise tagasiside võrdlus bioloogilistes ja tehnilistes süsteemides. Näeme, et bioloogilistes süsteemides toimub “uute mudelite”, s.t järgmise põlvkonna modifitseerimine paratamatult ja juhuslikult geneetiliste mutatsioonide kaudu, tehnilistes süsteemides aga inseneritöö tulemusena sihipäraselt eelmise mudeli puudusi kõrvaldades alles süsteemi järgmises mudelis. Sama mudeli erinevate instantside (eksemplaride) vahel juhuslikku erinevust praktiliselt pole.²⁰

6.2.4 Evolutsioonisarnane tagasiside

Tehnilistes süsteemides on veel teinegi tagasiside mehhanism, mis toimib sarnaselt evolutsioonilise tagasisidega, kuid mitte põlvkondade vahetuse kaudu, vaid põlvkonnasiseselt ja üha sagedamini isegi indiviidisiseselt.

Seda on kõige lihtsam selgitada nutitelefonil näitel. Kui me kasutame oma nutitelefonil mingi süsteemi juhtimismehhanismi osana ja

²⁰ Mõned seadmed võivad oma komponentide defektide tõttu siiski erineda, kuid üldjuhul loetakse neid rikkis olevateks ja seega pole nad tolle mudeli instantsid.

sellel juhtimissüsteemil ilmneb mingi piiratus, siis enamikul juhtudest ei pea me lahenduse kasutuselevõtuks uut nutitelefoni hankima – piisab, kui me vahetame välja asjassepuutuva programmi. Olgu selleks siis telefoni opsüsteemi uus versioon, mingi rakendusprogrammi uus versioon või lausa uus rakendusprogramm.

See ei tarvitse alati võimalik olla – kui telefonis GPS-vastuvõtjat pole, siis seda ei asenda ükski programm. Aga raadiojaamu on igas telefonis piisavalt, et jooksvalt kaardimaterjali uuendada või lähikonna teiste nutitelefonidega liiklusolukorra kohta teavet vahetada. Kui vaid tarkvara seda toetab.

Sellist tarkvara uuendamise kaudu, ilma riistvara muutmata tehtavaid juhtimissüsteemi võimekuse muutmisi nimetamegi tinglikult *evolutsioonisarnaseks tagasisideks*.

Tegelikult on evolutsioonisarnane tagasiside omane ka bioloogilistele keeleolendeile, st inimestele. Inimene saab mitmesuguste probleemide ilmnemisel indiviidi tasemel oma funktsionaalset võimekust vajadusel oluliselt korrigeerida. Selleks on lausa mitu põhimõtteliselt

erinevat viisi

| | |
|------------------------------|---|
| 1) <i>hariduslikult</i> või | Kui hariduslikult, ümber- ja juurdeõppimise teel saab parandada intellektuaalseid puudujääke, siis meditsiinilise sekkumisega saab parandada ilmnevaid füsioloogilisi vajaka-jäämisi. |
| 2) <i>meditsiiniliselt</i> . | |

Märksõnaregister

- andmed ja informatsioon, 81, 82
 - mõõtmine, 84
 - mõõtühikud, 87
- andmeliiasus, 87
- andur, 122
- arusaamine, 104
- asutus, 138
- atribuut (*filos.*), 99
- autokatalüütiline reaktsioon, 74

- bait, 87
- Beloussovi-Žabotinski reakts., 74
- Bénardi efekt, 74
- bitt, 86
- Boltzmanni entroopiavalem, 47
- Boltzmanni konstant, 47, 49
- Brillouini printsip, 90
- brüsselaator, oregonaaator, 77
- Brüsseli koolkond, 71

- dialektiline materialism, 99
- dissipatiivsed struktuurid, 71
- dissipatsioonifunktsioon, 67

- eesmärk, 137, 138
 - tegutseja jaoks, 140
 - vaatleja jaoks, 140
- elu, 5
- elussüsteem, 5, 104
 - vajadused, 112
- emergents, 72, 113
- energia, 15
 - dissipatsioon, 56
 - jäävus, 18, 20
 - kineetiline, 15
 - mehaaniline, 15
 - potentsiaalne, 15
 - sise-, 20
 - soojusenergia, 18
- enesesarnasus, 126
- entroopia, 28, 29, 35
 - Boltzmanni, 47
 - elussüsteemis, 110
 - Gibbsi, 50
 - ja korrapäratus, 56
 - kasvamine, 55
 - molaar-, 30
 - piirhinnangud, 34
 - Shannoni, 115
- entroopiaseadus, 23, 66
- entroopiavõidujooks, 59
- ergoodsus, 52
- evolutsioon, 67, 112
 - isoleeritud süsteemis, 35
- evolutsioonikriteerium, 67
- evolutsiooniteooria, 112

- fenomenoloogiline teooria, 14
- fluktuatsioonid, 51

fraktaalsus, 126
 fraktal, 127

 generaator, 70
 Gibbsi entroopiavalem, 50

 hajusoojus, 66
 hapnikukatastroof, 60
 hierarhia, 92
 homöostaas, 112

 ideaalne (*filos.*), 99
 ideaalne gaas, 13, 40
 informatsioon, 80, 88, 98, 106, 120
 arusaamine, 104
 mõõtmise, 85, 88
 semantiline tähendus, 98, 103
 informatsiooniteooria, 83
 kriitika, 90

 juhtimine, 111, 138
 juhtimisülesanne, 144
 seadeväärtus, 145
 tagasisidestatud, 144
 teadvustatud, 139
 juhtimisviis
 adaptiivne, 147
 evolutsiooniline, 151
 lihtsa tagasisidega, 144
 tagasisideta, 142
 jõud
 dissipatiivsed, 15
 konservatiivsed, 15
 jäävusseadused, 19

 kahjulik, 112
 kasulik, 112
 kasutegur, 24
 keel, 127

 mõisted, 128
 sõnad, 129
 sõnavara, 128
 keerulisus, 113
 mõõt, 114
 organiseerimata, 113
 organiseeritud, 113
 keskkond, 8
 kommunikatsioon
 vt. suhtlus, 119
 kommunikatsioonimudel, 118
 saatja-vastuvõtja, 118
 suhtleja-keskkond, 120
 kontekst, 133
 konvektsioon, 74
 kristall, 13

 liikumine
 filos., 99
 degradeerumine, 56
 lineaarne operaator, 63
 lineaarne süsteem, 63
 lineaarsuse tingimused, 63
 lokaalse tasakaalu eeldus, 63
 Lotka-Volterra mudelit, 73

 maailmapilt, 122
 mateeria (*filos.*), 99
 liikumise kord, 100
 mittelineaarsus, 70
 mudel
 kamber-, 61
 pidevkeskkonna-, 61
 muutujad, 9
 ekstensiivmuutujad, 10
 intensiivmuutujad, 10
 komplementaarsed, 21
 olekumuutujad, 10

sisemuutujad, 9
 välismuutujad, 9
 mälu, 106, 113
 negentroopia, 58, 88, 90, 116
 olek, 10
 makro-, 40
 mikro-, 40
 olekufunktsioon, 10, 22
 olekumuutujad, 10, 22
 statsionaarne, 11
 tasakaaluline, 11, 12, 14
 olend (*filos.*), 105
 omailm, 123
 ontoloogia, 129
 oregonaaator, brüsselaator, 77
 organisatsioon, 138
 filosoofia mõiste, 135
 juhitav osa, 137
 juht, 137
 organiseeritus, 57, 105, 116
 absoluutne, 116
 elussüsteemi, 105
 suhteline, 116
 organism, 135
 ostsillaator, 70
 otsustusvõime, 106
 parameetrid, 9
 printsiip
 Brillouini, 88, 90
 Joule'i, 18
 protsess, 9
 adiabaatiline, 23
 isotermiline, 23
 mittetasakaaluline, 26, 32
 mittepööratav, 32
 pööratav, 23
 tasakaaluline, 14, 23, 26
 tsükkel e ringprotsess, 23
 püsivus e stabiilsus, 69, 108, 111
 soojus, 18
 -masin, 24
 -ülekanne, 18
 haju- e dissipeeruv, 66
 taandatud, 26
 stabiilsus e püsivus, 69
 stabiliseerimine, 112
 statistiline
 ansambel, 52
 kaal, 41
 struktuur, 71
 ajaline, 70
 ajalis-ruumiline, 74
 ruumiline, 74
 struktuursus, 112
 funktsioneeriv, 105, 110
 suhtlus
 andurid, 124
 funktsiooniring, 124
 keel, 127
 mõistemudel, 129
 märkamispunktid, 124
 omailm, 124
 partnerid, 124
 protokoll, 119
 suhtleja, 120
 suhtluskeskkond, 120
 sõnum, 118, 126
 toimimispunktid, 124
 täitured, 124
 sümbolid, 84, 90, 92
 "0" ja "1", 85

binaar-, 86
 laiendatud, 92
 tähestik, 81, 86
 sünergeetika, 61
 süsteem, 5, 8
 adaptiivne, 113
 adiabaatilisel isoleeritud, 8
 avatud, 8
 evolutsioon, 35
 evolutsioonikriteerium, 36
 isoleeritud, 8
 kinnine, 8
 makroolek, 40
 mikroolek, 40
 muutujad, 9
 olek, 10
 parameetrid, 9
 siseenergia, 20
 vabadusastmete arv, 22
 vabadused süsteemis, 136
 ökoloogiline, 141
 süsteemiteooria, 69
 tagasiside, 74, 144
 evolutsioonisarnane, 153
 negatiivne, 70, 145
 positiivne, 70, 144
 taksonoomia, 130
 teadvus, 139
 temperatuur, 12
 teoreem
 Carnot', 25
 Onsageri, 65
 Prigogine'i, 66
 termodünaamika
 universum, 36
 termodünaamika, 7
 dissipatiivsete süsteemide, 61
 0-is seadus, 12
 I seadus, 18, 20, 21
 II seadus, 23, 32, 35, 66
 III seadus, 30
 klassikiline, 14
 mittetasakaaluline, 61
 põhivõrrand, 63
 pöördumatute protsesside, 61
 seadused, 7
 standardtingimused, 30
 statistiline, 39
 universum, 35
 termodünaamiline tõenäosus, 41
 tsükkel, 23
 Carnot', 23
 turbulents, 73
 täitur, 122
 töö, 16
 vabadusastmed, 12
 vabadusastmete arv, 22
 vabadused süsteemis, 136
 piiramine, 136
 valikuvabadus, 136
 vabaenergia
 Gibbsi, 37
 Helmholtzi, 36
 valem
 Boltzmanni, 47
 Gibbsi, 50
 Shannoni, 115
 Stirlingi, 43
 valge müra, 93
 üldistatud jõud, 16
 üldistatud koordinaadid, 16

Kasutatud pildimaterjal

- Esikaane foto** Chris Gray, UK. *A close up of a zebra in which the eyes are almost hidden*. Corbis Images. ID: 42-29355947.
- Tagakaane foto** Xunbin Pan, China. *Animal Zebra*. Dreamstime.com, ID: 13497372.
- Joonis 2.6** Joonised raamatust П. Эткинс *Порядок и беспорядок в природе* [3].
- Joonis 2.7** Joonis raamatust П. Эткинс *Порядок и беспорядок в природе* [3].
- Joonis 2.9** Töötlus Günther Reindorffi illustratsioonist raamatule Fr. R. Kreutzwald *Eesti rahva ennemuistsed jutud*, Tln: Eesti Riiklik Kirjastus, 1953.
- Joonis 3.5** Joonis raamatust А. И. Зотин, ред. *Термодинамика биологических процессов* [29], с 51.
- Joonis 3.8** NASA satelliitfoto *Vortex street off Baja California, Mexico*. – Pildikogus *Visible Earth: A catalog of NASA images and animations of our home planet*. <http://visibleearth.nasa.gov/view.php?id=59195>.
- Joonis 3.9** Joonis Wikipedia artiklist *Rayleigh-Bénard convection* http://en.wikipedia.org/wiki/Rayleigh-Bénard_convection.
- Joonis 3.10**
- (a) – Georgia Instit. Technol., USA.
<http://www.catec.gatech.edu/grade/mecheng/images>
 - (b) – Wikipedia artiklist *Natural convection*.
<http://en.wikipedia.org/wiki/File:Convection1.gif>
 - (c) – S. W. Morris, Univ. Toronto, Canada. *Large spiral in convection*.
Flickrriver. <http://www.flickr.com/photos/nonlin/3595528416/>.
- Joonis 3.11** S. W. Morris (photography) and M. Rogers (chemistry), Univ. Toronto, Canada. *Belousov-Zhabotinsky reaction*. Flickrriver.
<http://www.flickr.com/photos/nonlin/>.
- Joonis 3.12** A. Žabotinski (1974) joonis raamatust А. Б. Рубин *Биофизика* [23], рис IV.8, с 101. <http://library.biophys.msu.ru/rubin/>.
- Joonis 4.1** Koloreeritud koopia standardi EVS/IEC 2382.1:1998 leheküljest.
- Joonis 4.2** Koopia H. Nyquisti artikli [17] leheküljest.
<http://archive.org/stream/bell00systemtechniamervol3rich/page/324/mode/2up/search/Nyquist>.
- Joonis 5.1** Vladkiselev, Russia. *Wolves' rut*. Dreamstime.com, ID: 6811227.

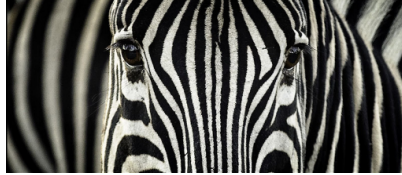
Viidatud kirjandus

- [1] Ю. Г. Антомонов *Моделирование биологических систем*. Киев: Наукова Думка, 1977.
- [2] P. W. Atkins *The Second Law*. Scientific American Books, 1984.
- [3] П. Эткинс *Порядок и беспорядок в природе / Перевод с английского*. Москва: Мир, 1987.
- [4] J. Baez “The Earth – for physicists,” *Physics.World.com*, 2002, July. – *Internetis aadressil*: <http://physicsworld.com/cws/article/print/2009/jul/31/the-earth-for-physicists>
- [5] L. Brillouin “The negentropy principle of information,” *J. Appl. Physics*, Vol 24, No 9, 1152–1163, 1953.
- [6] N. Callaos, B. Callaos, “Toward a systemic notion of information: Practical consequences,” *Informing Science*, Vol 5, No 1, 1–11, 2002. – *Internetis aadressil*: <http://www.inform.nu/Articles/Vol5/v5n1p001-011.pdf>
- [7] D. Dubrovsky *The Problem of the Ideal: The Nature of Mind and Its Relationship to the Brain and Social Medium / Translation into English*. Moscow: Progress Publishers, 1988. (Extracts.) Chapter 1, Section 2; Chapter 8, Section 4: 17-23, 280-283. In: *The Autodidact Project* by Ralph Dumain. – *Internetis aadressil*: <http://www.autodidactproject.org/other/dubrov1.html>
- [8] P. Glansdorff, I. Prigogine *Thermodynamic theory of structure, stability and fluctuations*. New York: John Wiley, 1971.

- [9] П. Гленсдорф , И. Пригожин *Термодинамическая теория струкиуры, устойчивости и флуктуаций / Перевод с англ.* Москва: Мир, 1973.
- [10] P. Glansdorff, G. Nicolis, I. Prigogine “The thermodynamic stability theory of non-equilibrium states,” *Proc. Nat. Acad. Sci. USA*, Vol 71, 197–199, 1974.
- [11] J. Kaasik, Ü. Kaasik *Kombinatoorika: õppematerjal MFK õpilastele.* Tartu Ülikool, Tartu Matemaatika- ja Füüsikakool, 1990.
- [12] J. Keizer, R. F. Fox “Qualms regarding the range of validity of the Glansdorff-Prigogine criterion for stability of non-equilibrium states,” *Proc. Nat. Acad. Sci. USA*, Vol 71, 192–196, 1974.
- [13] Ü. Lepik, J. Engelbrecht *Kaoseraamat.* Tln: Teaduste Akadeemia Kirjastus, 1999.
- [14] R. Mankin, E. Reiter *Statistiline termodünaamika I.* Tallinna Tehnikaülikool, 1992, Lisa 3.1: Tingliku ekstreemumi leidmine Lagrange’i meetodil.
- [15] A. Mets *Ilya Prigogine’i raamatu ”Tõsikindluse lõpp: Aeg, kaos ja uued looduseadused” filosoofiline analüüs ja looduseaduste käsitletus.* – Magistriväitekirj. Tartu Ülikool, 2007. *Internetis aadressil:* http://dspace.utlib.ee/dspace/bitstream/handle/10062/2839/mets_ave.pdf?sequence=1
- [16] R. Naadel *Automaatjuhtimise alused.* Tallinna Tehnikaülikool, 2006. – *Internetis aadressil:* <http://www.ene.ttu.ee/elektriamid/oppeinfo/?aineкод=AAR0020&materjalid=153>
- [17] H. Nyquist “Certain factors affecting telegraph speed,” *The Bell System Technical Journal*, Vol 3, 324–346, 1924.
- [18] M. Ott “Olenditeooria,” *Studia Philosophica Estonica*, Vol 4.1, 1–19, 2011. – *Internetis aadressil:* <http://www.spe.ut.ee/ojs-2.2.2/index.php/spe/article/viewArticle/81>

- [19] V. Parve *Filosoofilisi teadvuskontseptsioone: Õppevahend filosoofiat õppijaile*. Tartu Ülikool, filosoofia ja poliitikateaduse kateeder, 1991.
- [20] I. Piir *Termodünaamika ja statistiline füüsika II*. Tartu Riiklik Ülikool, 1963.
- [21] H. Poincaré *Science and Hypothesis*. London: Walter Scott Publishing, 1905, Ch 10: The Theories of Modern Physics, 166–167. – *Internetis aadressil*: http://www.brocku.ca/MeadProject/Poincare/Poincare_1905_11.html
- [22] I. Prigogine, I. Stengers *The End of Certainty: Time, Chaos, and the New Laws of Nature*. New York etc: Free Press, 1997.
- [23] А. Б. Рубин *Биофизика*. Москва: МГУ, кафедра биофизики, 1999. – *Internetis aadressil*: <http://library.biophys.msu.ru/rubin/>
- [24] T. Sarapuu, M. Viikmaa, I. Puura *Bioloogia gümnaasiumile*. II osa, 4. kursus. Tartu: Eesti Loodusfoto, 2006.
- [25] E. Schrödinger *What is life? The Physical Aspect of the Living Cell; with Mind and Matter and Autobiographical Sketches*. New York etc.: Cambridge University Press, 2000. – *Internetis aadressil*: http://whatislife.stanford.edu/LoCo_files/What-is-Life.pdf
- [26] Э. Шредингер *Что такое жизнь? С точки зрения физика. / Перевод с англ.* Москва: Атомиздат, 1972.
- [27] C. E. Shannon “A mathematical theory of communication,” *The Bell System Technical Journal*, Vol 27, 379–423, 623–656, 1948.
- [28] М. Сухарев “Движение порядка в природе.” – *Internetis aadressil*: <http://suharev.narod.ru/>
- [29] А. И. Зотин, ред *Термодинамика биологических процессов*. Москва, Наука, 1976.
- [30] H. Veermäe, T. Örd *Analüütiline mehaanika. Loengukonspekt*. Tartu Ülikool, 2011, ptk 3: Vähima mõju printsiip, lk 31–43. – *Internetis aadressil*: http://www.e-ope.ee/_download/euni_repository/file/2217/AM_konspekt.pdf

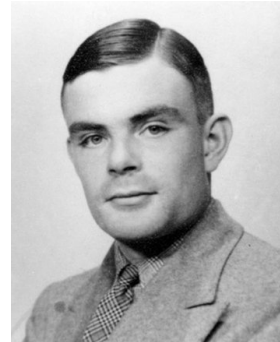
- [31] A. M. Turing “The chemical basis of morphogenesis,” *Philos. Trans. Royal Society B: Biological Sciences*, Vol 237, No 641, 37-72, 1952. - *Internetis aadressil*: <http://www.jstor.org/stable/92463>
- [32] Scholarpedia (2012) “Oregonator.” Department of Chemistry, The University of Montana, Missoula, MT 59812. - *Internetis aadressil*: <http://www.scholarpedia.org/article/Oregonator>
- [33] Wikibooks (2012) “Control Systems/System Identification,” in *The Wikibook of Control Systems and Control Engineering*. - *Internetis aadressil*: http://en.wikibooks.org/wiki/Control_Systems/System_Identification
- [34] Wikipedia (2012) “Heat death of the universe.” - *Internetis aadressil*: http://en.wikipedia.org/wiki/Heat_death_of_the_universe
- [35] Wikipedia (2012) “Stability.” - *Internetis aadressil*: <http://en.wikipedia.org/wiki/Stability>
- [36] Wikipedia (2012) “Complexity.” - *Internetis aadressil*: <http://en.wikipedia.org/wiki/Complexity>
- [37] Wikipedia (2012) “Homeostasis.” - *Internetis aadressil*: <http://en.wikipedia.org/wiki/Homeostasis>
- [38] Wikipedia (2012) “Linear system.” - *Internetis aadressil*: http://en.wikipedia.org/wiki/Linear_system
- [39] Wikipedia (2012) “Lotka–Volterra equation.” - *Internetis aadressil*: http://en.wikipedia.org/wiki/Lotka–Volterra_equation
- [40] Wikipedia (2012) “Rayleigh–Bénard convection.” - *Internetis aadressil*: http://en.wikipedia.org/wiki/Rayleigh%E2%80%93B%C3%A9nard_convection
- [41] Wikipedia (2012) “Systems theory.” - *Internetis aadressil*: http://en.wikipedia.org/wiki/Systems_theory



Kaanepildi juurde

Kaanel olev foto *sebra pilgust* on illustreerib elusolendite juures jälgitavat naha või karvkatte mustrite fenomeni. Sebrade ja paljude teiste loomade karvkattel on keerulised ja individuaalsed, aga samas liigile iseloomulikud mustrid. Selliste mustrite teke oli kaua seletamata, kuni 1952. a avaldas tuntud briti matemaatik Alan Turing oma sellekohase töö “The Chemical Basis of Morphogenesis” (*Morfogeneesi keemiline alus*) [31].²¹ See avas tee taolistest nähtustest arusaamiseks.

Turingi idee karvamustrite tekkimise kohta sarnaneb meie konspektis vaadeldud Beloussovi-Žabotinski reaktsioonil tekkivate kujundite seletusega, aga on esitatud üle 10 aasta varem. Mõlemal juhul on tegemist difusiooniprotsessi ja reaktsiooniprotsessi koostoimega, karvamustrite puhul difundeeruvad mingi värvusetekke aktivaatori molekulid, kuid ühtlasi toimuvad nendega ka reaktsioonid, mille käigus tekib värvusetekke inhibiitor. Nende protsesside koostoime looma keha pinnal saab tekitada aktivaatori enam-vähem püsiva kontsentratsiooni mustri looma nahas ja sealtskaudu ka karvkatte püsiva mustri.



Alan Mathison Turing
1912–1954, Suurbritannia

Kaanepildi autor on noor inglise fotograaf Chris Gray. Foto on pildistatud Lõuna-Aafrikas.

²¹ Vt. veebilehelt <http://www.jstor.org/stable/92463>

